ONDAS EN EL ESPACIO-TIEMPO

PARASITISMO Y EVOLUCION

INVESTIGACION y CIENCIA

JUNIO 2002
5 EURO

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN



La proteómica en el horizonte

De los núcleos atómicos a las proteínas

Halitosis

Física de los modos discretos

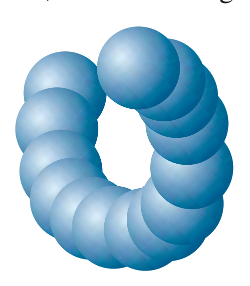
00309
9 770210 136004



Junio de 2002 Número 309

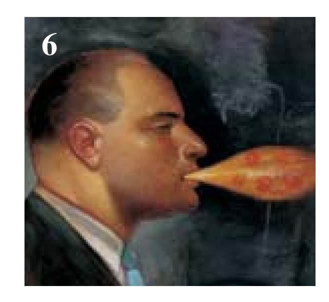
SECCIONES

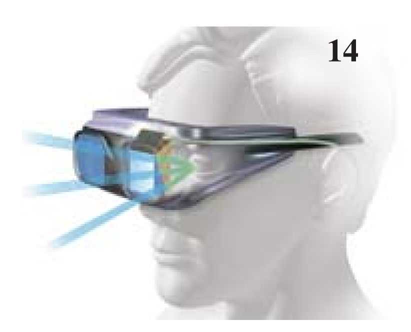






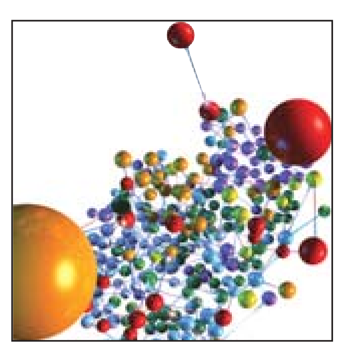






Edición española de **SCIENTIFIC AMERICAN**

SECCIONES



Portada: Slim Films

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
4	BSIPS/SERCOMI *Photo Researchers, Inc.* (*arriba*); JPL/NASA (*arriba*)
5	Scott Camazine y Sharon Billota-Best *Photo Researchers, Inc.* (*arriba*); Matt Collins, cortesía de Malin Space Science Systems y Devon M. Burr et al. en *Geophysical Research Letters*, vol. 29, n.º 1, 15 de enero de 2002
7-10	Joseph Daniel Fiedler
11	Rellu Samuel, Univ. de Tel Aviv (*arriba*); Nina Finkel (*abajo*)
12	Joseph Daniel Fiedler
14-15	Pat Rawlings/Saic
17-18	Bryan Christie Design, basado en un prototipo de Mixed Reality Systems Laboratory, Inc.
20	Tobias Hollerer, Steven K. Feiner y John Pavlik (*fotografías de la izquierda*); Jannick Rolland (*derecha*)
24	Werner Benger AEI/ZIB (*visualización*); Numerical Relativity Group at AEI (*simulación*); LBNL/NERSC (*centro de cálculo*); Max Plank Society, EU Astrophysics Network Project, Dpto. de Energía de Estados Unidos (*patrocinador*)
27	Max Aguilera-Hellweg
28-29	Bryan Christie Design
31-33	Max Aguilera-Hellweg
46-47	Slim Films
49	Slim Films; cortesía de Duncan McRee *Syrrx* (*proteína*)
51	MDS Proteomics
53	Kay Chernush
55	F. X. Avilés, Instituto de Biotecnología y de Biomedicina, Univ. Autónoma de Barcelona
56-60	Ricardo A. Broglia/Le Scienze
62	Francis M. Jiggins
64-65	Thierry Rigaud et al. (*izquierda*); John H. Werren (*derecha*)
66	Nina Finkel
67	Merijn Salverda y Richard Stouthamer (*arriba*); Claudio Bandi y Luciano Sacchi (*abajo*)
68-75	Luis M. Floría, José Luis Marín y Juan J. Mazo
77-79	Herzog Anton Ulrich Museum
80	Victoria and Albert Museum, Londres; Erika Speel (*fotografía*)
81	Herzog Anton Ulrich Museum
82-83	Bruno Vacaro
86-87	Bryan Christie Design
88	Vlad Guzner
96	Sara Chen

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Esteban Santiago: *La halitosis*; Luis Bou: *Una nueva forma de visión: la realidad complementada, Aventuras problemáticas* y *Apuntes*; M.ª Rosa Zapatero: *Ondas en el espacio-tiempo*; José M.ª Valderas Martínez: *De los núcleos atómicos a las proteínas* y *Nexos*; Santiago Mas Coma: *Parasitismo y evolución*; Carmina Fuster: *¿Obra de arte auténtica o genial falsificación?*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; J. Vilardell: *Hace..., Curiosidades de la física* e *Ideas aplicadas*

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL José M.ª Valderas Gallardo
DIRECTORA FINANCIERA Pilar Bronchal Garfella
EDICIONES Juan Pedro Campos Gómez
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón
Bernat Peso Infante
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado
Olga Blanco Romero
EDITA Prensa Científica, S. A. Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona (España)
Teléfono 93 414 33 44 Telefax 93 414 54 13

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR IN CHIEF John Rennie
EXECUTIVE EDITOR Mariette DiChristina
MANAGING EDITOR Michelle Press
ASSISTANT MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Philip M. Yam
SPECIAL PROJECTS EDITOR Gary Stix
SENIOR WRITER W. Wayt Gibbs
EDITORS Mark Alpert, Steven Ashley, Graham P. Collins, Carol Ezzell, Steve Mirsky y George Musser
PRODUCTION EDITOR Richard Hunt
VICE PRESIDENT AND MANAGING DIRECTOR, INTERNATIONAL Charles McCullagh
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Gretchen G. Teichgraeber
CHAIRMAN Rolf Grisebach

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413

Precios de suscripción:

	Un año	Dos años
España	55,00 euro	100,00 euro
Extranjero	80,00 euro	150,00 euro

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 5,00 euro
Extraordinario: 6,00 euro

—El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

LOGISTA, S. A.
Aragoneses, 18 (Pol. Ind. Alcobendas)
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 914 843 900

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª – 08021 Barcelona
Teléfono 934 143 344

PUBLICIDAD

GM Publicidad
Francisca Martínez Soriano
Menorca, 8, semisótano, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 914 097 045 – Fax 914 097 046

Cataluña y Baleares:
Sergio Munill
Valencia, 58 entlo. 2.ª
08015 Barcelona
Tel. y fax (34) 932 263 624

Difusión controlada ojd

ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 – 76

Filmación y fotocromos reproducidos por Dos Digital, Zamora, 46-48, 6ª planta, 3ª puerta - 08005 Barcelona
Imprime Rotocayfo-Quebecor, S.A. Ctra. de Caldes, km 3 - 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

HACE...

...cincuenta años

TRANSISTORES PARA TODOS. «El transistor de uniones ya está al alcance de todos. El mes pasado se anunciaba la llegada a los comercios de este revolucionario sustituto del tubo de vacío. El transistor se ha estudiado a fondo en los laboratorios de Bell Telephone, General Electrics y Radio Corporation of America, todos los cuales le han introducido mejoras. Comienza ahora la competencia ávida por los mercados. Un distribuidor citó un precio de 30 dólares por un transistor.»

NO SE APURE. «¿Por qué un mismo tipo de cáncer se desarrolla más deprisa en unos pacientes que en otros? En el Hospital de Veteranos de Long Beach (California) un equipo de investigadores seleccionó a 25 pacientes cuyos cánceres crecían rápidamente y a 25 con cánceres más lentos. Los cincuenta fueron examinados con el Cuestionario Multifásico de la Personalidad de Minnesota, un test psicológico estándar que revela el tipo de personalidad. 'Las averiguaciones sugieren que las personas con tumores de crecimiento rápido poseen una fuerte tendencia a ocultar sus sentimientos íntimos y son menos capaces de hacer algo por reducir las tensiones.' Afirman estos investigadores que con medidas para aliviar la tensión psicológica se podría alargar la vida de los pacientes.»

PALUDISMO AL ESTILO ITALIANO. «Aún en 1945, había en Italia 411.600 casos de paludismo, si bien los casos de mortalidad, gracias a la atebrina, se habían reducido a 386. En los últimos tres años no se ha registrado ni una sola defunción a causa de esa enfermedad. Al fin de la guerra Alberto Missiroli, primer experto en paludismo del país, formuló un plan quinquenal para erradicarla totalmente. Los techos y las paredes interiores de todas las casas y corrales de las zonas afectadas se rociaron cada año justo antes de la temporada palúdica (*véase la ilustración*). Italia es un modelo de lo que puede lograrse gracias a la nueva arma contra el paludismo de que dispone la humanidad: el DDT y otros insecticidas similares, como el hexacloruro de benceno.»

...cien años

ESPERANZAS SUMERGIDAS. «El submarino es uno de esos ingenios que han padecido el celo de sus partidarios. Ahora, los ambientes navales experimentan la primera reacción que había de seguir inevitablemente a las exageradas alabanzas y las afirmaciones que les atribuían una potencia destructiva ilimitada. Nos bastaría con el importantísimo detalle de que el submarino es 'ciego'. En la superficie, la embarcación ve; pero sumergida, ni puede ver ni puede ser vista.»



Campaña antipalúdica en Italia, 1952: distribución de DDT

ENVASADO DE CARNES EN CHICAGO. «La industria del sacrificio y envasado de carnes de vaca, cerdo y carnero ha alcanzado tales dimensiones en Chicago —el mayor centro mundial de esa actividad—, que se han introducido los procesos más modernos al objeto de ahorrar tiempo y mano de obra, así como para aprovechar al máximo las reses. Al año se matan 3.000.000 de cabezas de vacuno y 5.000.000 de porcino para servir a 'la Ciudad del Envasado'. Se emplean máquinas hasta donde es posible, con el resultado de que una de las empresas más importantes trata 7000 cabezas de porcino al día, mientras que manualmente no se llegaría ni al diez por ciento de esa cifra.» [*Nota de la redacción: Upton Sinclair, en su libro* La jungla, *de 1905, expuso las espantosas condiciones de esa industria.*]

...ciento cincuenta años

TIERRAS VERDES. «El teniente Matthew Fountaine Maury, en un curioso memorial presentado ante el Senado y la Cámara de Representantes, expone: 'Imaginemos un inmigrante que llegase como colono al valle del Amazonas desde el interior de Europa. En ésta, su trabajo no podía mantenerlo ni del modo más frugal era imposible que fuese cliente de Estados Unidos. Pero en su nuevo hogar, donde se dice que el trabajo de un día de cada siete basta para colmar la mesa, dispone de lo suficiente para adquirirnos los artículos que más ansíe. Puede esperarse, cuando la inmigración se asiente en aquel valle, que Nueva York y Boston tendrán que abastecer a esa gente de productos del telar o del taller, desde un hacha y una azada hasta un traje de gala.'»

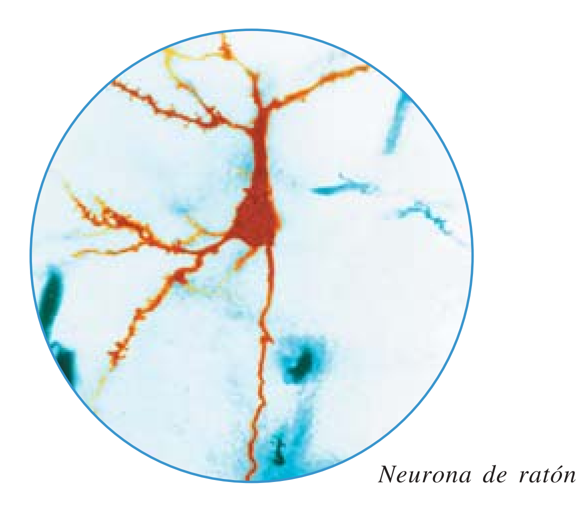
APUNTES

NEUROBIOLOGIA

Neuronas nuevas

Se sabe desde hace años que el cerebro genera nuevas neuronas, pero no había certeza de que después actuaran debidamente. Fred H. Gage y sus colaboradores del Instituto Salk de Estudios Biológicos de La Jolla, en California, han informado de que las células nerviosas recién creadas en individuos adultos parecen desempeñar sus funciones con destreza no menor que las antiguas. Observaron en ratones que las neuronas recientes llegaban a adquirir formas similares a las que presentan las maduras. Parece que se integran en la red electrofisiológica del cerebro. La pregunta, en estos momentos, es: ¿de qué modo utiliza el cerebro esas células recién engendradas? El grupo de Gage se dedica ahora a averiguarlo. El trabajo se publicó el 28 de febrero en *Nature*.

—Alison McCook



Neurona de ratón

ASTROFISICA

Erupciones de rayos gamma

Un grupo de la Universidad de Leicester ha analizado la radiación residual en rayos X que siguió a una erupción de rayos gamma del 11 de diciembre de 2001. En ella ha descubierto indicios de que una explosión de supernova estuvo ligada a la erupción (*Nature* del 4 de abril de 2002). Sus resultados descartan —al menos en este caso— otras hipótesis que atribuyen esas inmensas, efímeras y remotas emisiones de energía a colisiones entre estrellas de neutrones o estrellas de neutrones y agujeros negros. Las erupciones se diferenciarían de una supernova corriente en que el derrumbe estelar que genera el estallido dejaría como resto un agujero negro. En el llamado modelo de los colapsares o hipernovas, supernova y erupción son simultáneas. En la hipótesis de las supranovas, se forma primero una estrella de neutrones inestable que, pasado un tiempo que el modelo no determina, se derrumba a su vez y crea el agujero negro; en ese segundo paso es cuando se generaría la erupción.

La observación del rescoldo empezó once horas después del brote de rayos gamma y abarcó unas siete horas. Se detectaron en el espectro líneas de emisión de elementos ligeros, pero no de hierro (al contrario que en algunas otras erupciones). La interpretación es que las líneas procedían de un caparazón de material, expulsado por una supernova y calentado poco después por la erupción de rayos gamma, que se expandía a un décimo de la velocidad de la luz. El grupo de Leicester, con este dato y el valor que le calculan al radio del caparazón, deduce que pasaron unos cuatro días entre la supernova y la erupción, plazo que explica la ausencia de hierro. (En las capas exteriores de la supernova, las expulsadas, se genera por desintegración radiactiva del níquel y del cobalto, pero hacen falta más días para que se produzca una cantidad considerable.)

En marzo, dos nutridos grupos habían comunicado pruebas a favor del modelo de los colapsares (astro-ph/0203391 y astro-ph/0203467), obtenidas de la observación de una erupción un poco anterior a la del grupo de Leicester. Charles D. Dermer (astro-ph/0204037), sin cuestionar las observaciones, somete a duro análisis las interpretaciones ofrecidas. Dermer recuerda un ensayo de M. J. Harris acerca del riesgo de que, una vez se ha adoptado una hipótesis astrofísica (una “síntesis”, lo llamaba Harris), se criben los resultados nuevos de manera que parezca que la respaldan.

OBJETOS CERCANOS A LA TIERRA

Peligro de colisión

La mala noticia es que hay una probabilidad entre trescientas de que un asteroide de un kilómetro de envergadura, el 1950 DA, se estrelle contra la Tierra; según la NASA, no hay, que se sepa, otro con un riesgo mayor de choque. La explosión, de cien mil megatones, sembraría la desolación en todo el planeta. La buena noticia es que no ocurriría sino el 16 de marzo de 2880.

Lo más probable es que el asteroide no atine con la Tierra; son veinte los minutos peligrosos, y 1950 DA se adelantará o retrasará varios días. Se desconocen muchos factores; en particular, el eje de rotación de la roca. Su orientación determina la dirección en que la empujará la reemisión de la luz solar que vaya absorbiendo. Según Joseph N. Spitale, de la Universidad de Arizona, podríamos aprovechar este tipo de impulso —el efecto Yarkovski— para desviar de nuestra trayectoria cuerpos de esa naturaleza. Cubrir un asteroide de polvo de tiza o de carbón, pintarlo de blanco, hasta recubrirlo con mylar, alteraría sutilmente su velocidad. Un plan así, ejecutado con decenios o siglos de antelación, apartaría las rocas más amenazadoras. Para más detalles, véase el número del cinco de abril de *Science*.

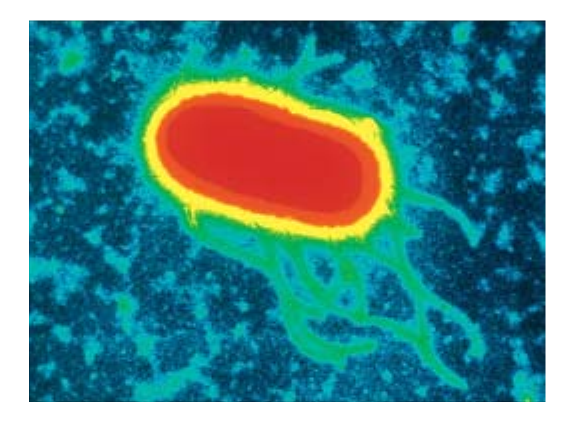


Se nos acerca: imagen por radar del asteroide 1950 DA

MICROBIOLOGIA

Bacterias sometidas a presiones extremas

Creíase que sólo podían soportar presiones muy elevadas los contados microorganismos que se han adaptado a ellas, como los que habitan en las profundidades de las fosas oceánicas. Tenemos ahora pruebas de que las resisten incluso bacterias comunes, las que moran en el intestino humano entre ellas. Unos investigadores de la Institución Carnegie de Washington comprimieron entre caras de diamante dos especies: *E. coli*, que tapiza los intestinos, y *Shewanella oneidensis*, que digiere metales. Sufrieron presiones que multiplicaban por 16.000 la del nivel del mar. Para encontrar fuerzas así, que congelarían el agua a temperatura ambiente, hay que descender 50 kilómetros por debajo de la superficie de la Tierra. Los resultados, expuestos en el número del 22 de febrero de *Science*, refuerzan la idea de que podría haber vida en los hielos profundos de la Antártida o en Europa, Calisto y Ganímedes, lunas de Júpiter. —*Charles Choi*



E. coli, *habitual del intestino, puede medrar en las profundidades de la Tierra*

FILOSOFIA DE LA CIENCIA

La realidad

Se acepta que la física es una descripción de la realidad, verdadera en la medida en que coincide con ésta. Pero las palabras de esta frase son, antes que nada, meros signos; quien los utilice será responsable de qué haga con ellos. La palabra realidad no figura en el lenguaje de la física; pertenece al comentario. Que dista de ser clara en ese uso se comprueba en una curiosa encuesta del filósofo Robert P. Crease. Entregó a cientos de físicos una lista de términos y les preguntó si pensaban que correspondían a "cosas reales" (*Physics World*, abril 2002). La Tierra obtuvo el porcentaje más alto de síes, un 93 por ciento, como las piedras; las alucinaciones sólo un 40 por ciento (un 49 las emociones), menos que los números imaginarios (un 43 por ciento), muy superados por los reales (un 63), que sacaron casi la misma puntuación que los quarks y las ondas de luz (un 68 por ciento, contra un 72 por ciento de las longitudes de onda y un 50 de los colores). Las últimas posiciones fueron para el sistema ptolemaico (9 por ciento, por un 43 del copernicano), el átomo de Bohr (18 por ciento) y los infinitos de orden superior (un 26 por ciento, pero con el porcentaje más alto de indecisos, un 37 por ciento). La masa sacó un 76 (por un 66 de la viscosidad), los genes un 83 y los átomos, como los electrones, un 84 (un 77 sus estados excitados). La impresión resultante es de una gran confusión conceptual, engendrada en parte por la propia encuesta. Como recuerda Crease en su artículo, el célebre físico Steven Weinberg está en guerra con "los filósofos". Pero en esa campaña no hace física, sino filosofía (¿sin saberlo?). La filosofía quizá sea sobre todo, o debería ser, la crítica ineludible de las mismas palabras en que viene a existir.

PLANETAS

Marte hídrico

Indicios recientes respaldan la vieja teoría de que el planeta rojo alberga gran cantidad de agua. La misión *Mars Odyssey* ha detectado abundante hidrógeno en la superficie de su hemisferio sur, lo que refuerza la conjetura de que allí se encuentra una masa de hielo gigantesca. Este hallazgo se dio a conocer en una rueda de prensa celebrada en marzo. Los investigadores se proponen dedicar un par de años a recopilar más datos para mejor determinar la cantidad y ubicación exacta del hielo. También las imágenes de la Cámara Orbital Marciana han facilitado indicios de la existencia de agua. Los análisis de la Universidad de Arizona apuntan que el agua inundaba el sistema de canales Athabasca Valles hace tan sólo 10 millones de años, como se expone en el número del 15 de enero de *Geographical Research Letters*. Se trataría de la más reciente de las grandes riadas marcianas que se haya datado. De ello se infiere que pudiera existir todavía agua subterránea a gran profundidad bajo la pulverulenta corteza del planeta.
—*Alison McCook*



¿Una riada reciente? La región marciana de Athabasca Valles

La halitosis

El mal aliento, vieja afección, está recibiendo una atención científica renovada que ofrece maneras de diagnosticarlo y de remediarlo

Mel Rosenberg

Fíjese en lo que le pasa al doctor Juan Cepillo. Es un dentista metido hasta las cejas en su trabajo; se centra tanto en los pacientes, que con frecuencia se olvida de comer y hasta de beber. Sus dientes y encías son, por supuesto, ejemplares. Sin embargo, al Dr. Cepillo se le escapa un problema que emana de su propia boca. Sus pacientes lo saben, y lo sabe también el que le cuida la boca. Pero no se atreven a indicarle su mal aliento.

En este caso, como en muchos otros, el olor desagradable resulta de la actividad metabólica de las bacterias bucales que se alimentan con la secreción posnasal que suele acumularse en la parte posterior de la lengua del dentista. Las bacterias producen en su metabolismo una serie de productos de degradación. Gargarismos con un buen elixir dentífrico y la limpieza de la lengua aliviarían con casi toda seguridad el problema. Incluso mascar un poco de alimento ayudaría. De momento, sin embargo, los pacientes del dentista están protegidos sólo por su mascarilla quirúrgica.

Por supuesto, siempre ha habido conciencia del fenómeno del mal aliento, o halitosis (del latín *halitus*, aliento, y del griego *–osis*, condición anormal). Pero la halitosis empieza a ser ahora un problema científico fascinante, en que se funden una preocupación muy humana y un horizonte donde se cruzan diversos campos científicos, entre ellos la bacteriología, la química, la fisiología y la psicología.

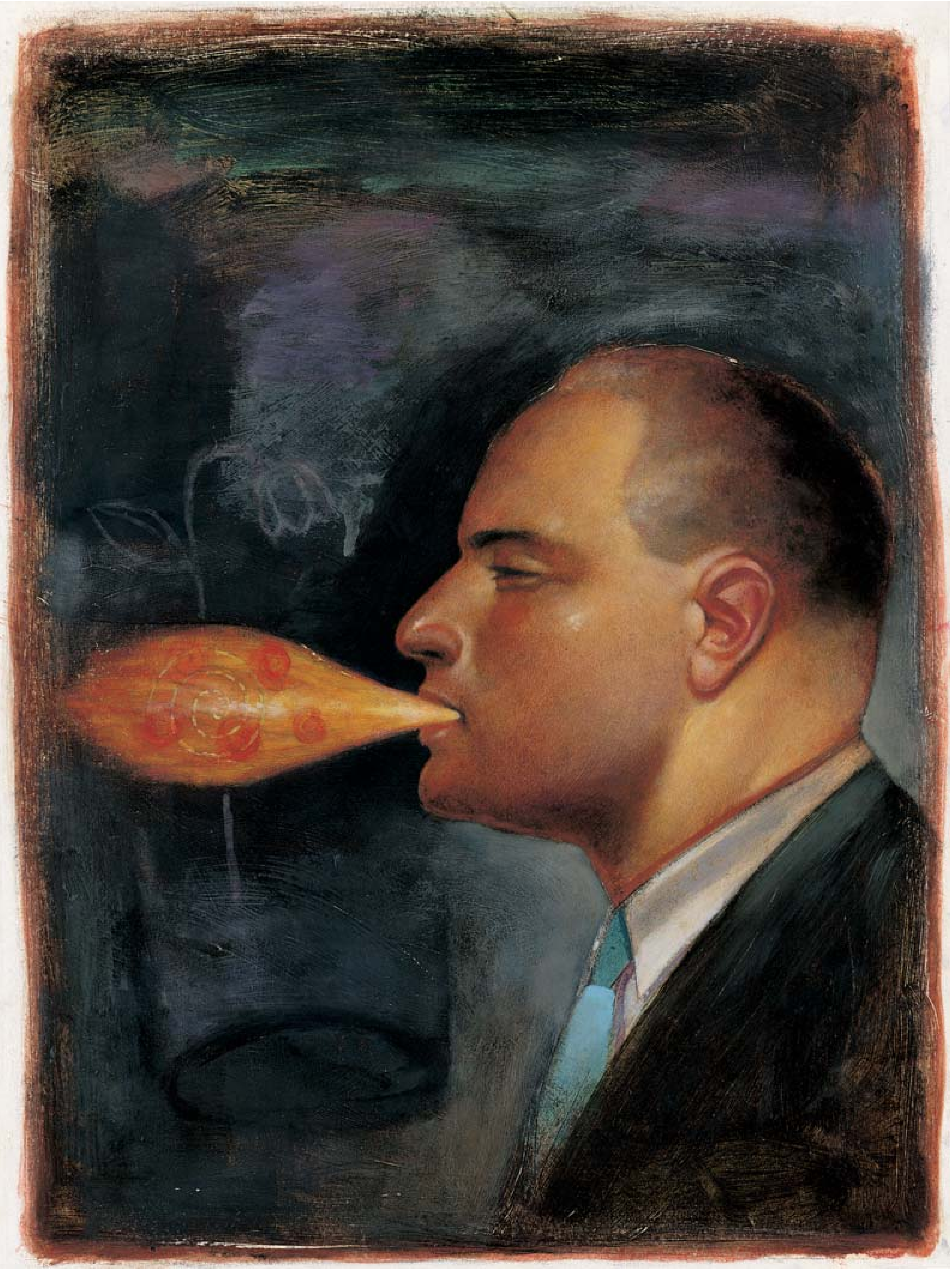
Millones de personas tienen mal aliento y, como el Dr. Cepillo, probablemente lo ignoran, lo que hace difícil generar una estadística precisa acerca de la frecuencia de la halitosis. Un estudio reciente, una encuesta entre estudiantes universitarios brasileños realizada por Paulo Nadanovsky, del Instituto de Medicina Social de Río de Janeiro, arrojó que el 31 por ciento de los preguntados tenía al menos un miembro de su familia al que le olía la boca, con consecuencias serias: el 24 por ciento señaló que le costaba encontrarse a gusto en la compañía de ese pariente y el 62 por ciento que el problema del mal aliento del familiar les afectaba en mayor o menor medida.

Mi interés por el tema comenzó hace casi 20 años, cuando mi grupo se embarcó en el desarrollo en dos fases de un elixir concebido para atrapar bacterias y detritos orales en la superficie de gotitas oleosas. En aquel momento, sólo unos cuantos investigadores, encabezados por Joseph Tonzetich, de la Universidad de la Columbia Británica, se dedicaban a estudiar la halitosis; ahora son cientos, en las universidades y en la industria. En julio del año pasado, la recién creada Sociedad Internacional para la Investigación del Mal Aliento (ISBOR) reunió unos 350 participantes en su quinto congreso internacional, celebrado en Tokio.

El crecimiento de esta ciencia refleja una preocupación pública general (en algunos casos hasta una obsesión) por el buen aliento. Según las investigaciones de mercado, los estadounidenses gastaron 2000 millones de euros en pasta de dientes, unos 780 millones en chicles para el cuidado de la boca, casi 810 millones en elixires dentífricos y otros enjuagues dentales, y cerca de 1050 millones en cepillos e hilos dentales. Aunque muchos de esos productos se destinan al mantenimiento de la salud bucal, la gente los com-

El autor

MEL ROSENBERG creció en Canadá y se trasladó a Israel en 1969. Es profesor de microbiología en la escuela de odontología Maurice y Gabriela Goldschleger, de la Universidad de Tel Aviv. En 1996, con Karl Laden y contando con respaldo universitario, fundó InnoScent, firma que desarrolla productos contra los malos olores corporales.



pra para que su aliento sea también agradable. Y los 690 millones de euros que gastan en refrescantes del aliento, además de en elixires y chicles, en pastillas de menta por ejemplo, van dirigidos precisamente a ese propósito.

La fuente del mal aliento

Las causas básicas de la mayoría de los casos de halitosis se conocen bastante bien. Según una investigación realizada por Daniel van Steenberghe, cofundador de ISBOR, y sus colaboradores de la Universidad Católica de Lovaina y por nuestro grupo de la Universidad de Tel Aviv, alrededor del 85 por ciento de los casos se origina en la boca. Como sucede con otros olores que emanan de las junglas microbianas húmedas del organismo —como las de los sobacos y los pies—, el mal aliento deriva, sobre todo, del metabolismo microbiano.

La boca es la sede de centenares de especies bacterianas con apetencias nutritivas diversas. A estos organismos minúsculos les gustan de manera especial las proteínas; los compuestos químicos resultantes de su digestión incluyen algunas sustancias fétidas. En cualquier momento las bacterias orales, por lo habitual anaeróbicas, pueden producir ácido sulfhídrico, con su olor característico a huevos podridos; metilmercaptano y escatol, también presentes en las heces; indol, que se usa en cuantía pequeña en los perfumes, pero desagradable en cantidades grandes; la cadaverina, asociada a la descomposición de cadáveres; la putrescina, que se genera en la carne corrompida; y el ácido isovaleriánico, que huele a pies sudados. No sorprende, pues, que el aliento humano pueda en ocasiones resultar tan desagradable.

Uno de los presidentes en el pasado de la ISBOR, Walter J. Loesche, de la Universidad de Michigan, descubrió hace poco que la microbiota de la lengua difiere de las especies que viven en la placa dentaria. Loesche, que recibió una ayuda económica de los Institutos Nacionales de la Salud (NIH) para estudiar la halitosis, ha descubierto especies bacterianas, no descritas hasta la fecha, que se asientan en nuestras cavidades bucales. En la actualidad se ocupa de la confección de un catálogo de la flora microbiana en personas con y sin halitosis, trabajo que espera completar este verano.

En quienes por lo demás están sanos, la parte posterior de la lengua es la fuente principal, antes que los dientes o las encías, del mal aliento. Esta región se limpia difícilmente con la saliva y contiene numerosas invaginaciones diminutas donde se esconden las bacterias, que pudren la secreción posnasal —común en una cuarta parte de las personas estudiadas que viven en medios urbanos— y otros detritos orales que pueden acumularse allí.

Son también fuentes bucales del mal aliento una higiene deficiente de la boca (sobre todo, si se permite que se acumulen partículas proteicas entre los dientes), la inflamación de las encías, un trabajo odontológico descuidado, una dentadura sucia y los abscesos. Como el flujo continuo de saliva elimina las bacterias y sus productos químicos olorosos, cualquier cosa que induzca sequedad —respirar por la boca, el ayuno, hablar largo tiempo, el estrés y centenares de medicamentos— puede exacerbar el problema. El tabaco es enemigo de un aliento fresco. Aunque fumar puede reducir la actividad bacteriana, este posible efecto positivo se viene abajo por otros negativos: el humo seca la boca, empeora la condición de las encías y la secreción posnasal, amén de dejar un residuo cuyo olor se mezcla con el preexistente en la boca.

En algunos casos el mal aliento parece estar asociado a la enfermedad periodontal —la destrucción de las encías— y constituye, por tanto, una clave útil para el médico y el dentista. El ácido sulfhídrico y el metilmercaptano son tóxicos, además del mal olor que tienen; pueden dañar las células y ser así un factor en la enfermedad de las encías. Además, algunas especies bacterianas implicadas en las enfermedades de las encías producen un hedor intenso cuando se las cultiva en el laboratorio anaeróbicamente en presencia de aminoácidos, según las investigaciones de Israel Kleinberg, de la Universidad estatal de Nueva York en Stony Brook. La presencia de varias de estas bacterias —*Treponema denticola*, *Porphyromonas gingivalis* y *Bacteroides forsythus*— en la placa o en el recubrimiento de la lengua puede determinarse en breves minutos en la clínica dental con una prueba de color llamada BANA (por benzoil-DL-arginina-naftilamida), que ideó Loesche. Estas bacterias sintetizan una enzima que degrada BANA y forma un nuevo compuesto coloreado. No es sorprendente que las estadísticas asocien las pruebas positivas de BANA con la halitosis.

Se ha considerado siempre que las bacterias orales que prefieren los azúcares a las proteínas no guardan relación con el mal aliento. Los trabajos de Nir Sterer en mi laboratorio, sin embargo, indican lo contrario. Una buena parte de las proteínas que hay en la boca se encuentra en forma de glicoproteínas, en las que el núcleo proteico está ligado a residuos glucídicos. Los organismos que se alimentan de azúcares pueden arran-

Resumen/Halitosis

- La halitosis, o mal aliento, es una afección frecuente que repercute en las relaciones personales. Por su parte, el temor permanente al mal aliento, la halitofobia, deteriora gravemente la calidad de vida de algunas personas.
- Los investigadores analizan desde hace poco la halitosis cualitativa y cuantitativamente; ahora empiezan a ofrecer ideas nuevas acerca de sus causas y posibles tratamientos. Así se han descubierto nuevas especies de bacterias bucales y se ha confirmado que la inmensa mayoría de los casos de halitosis se origina en la boca.
- Mantener el aliento fresco y la higiene de la boca son negocios de grandes dimensiones; cada año se gastan miles de millones de dólares en los Estados Unidos en dentífricos, cepillos, hilos dentales, elixires, pastillas de menta y otros refrescantes del aliento.

car éstos de las glicoproteínas, dejando las proteínas desnudas para que las bacterias inclinadas a nutrirse con ellas las digieran. Sterer y su grupo han demostrado, con una sencilla prueba cromatográfica, que la cantidad de azúcar escindido por la acción enzimática en la saliva se correlaciona con los niveles de mal aliento. En el futuro, es posible que se ataque el mal aliento evitando la escisión inicial del azúcar.

Hay la tentación de concluir que la erradicación de todos los microorganismos de la lengua sería un tratamiento potencial de la halitosis. Estas bacterias, sin embargo, desempeñan también una función protectora. De ordinario, la lengua alberga cierta cantidad del hongo *Candida*, similar a las levaduras; su población se mantiene bajo control gracias a las bacterias. Cuando éstas desaparecen de la lengua por acción de los antibióticos, *Candida* prolifera. Y las enfermedades que produce son más graves y difíciles de domeñar que la halitosis. Se trata, pues, de mantener las poblaciones bacterianas, aunque bajo control.

Más diagnósticos de halitosis

Las fuentes más habituales del mal aliento, después de la boca, son la nariz y las fosas nasales. En un 5 o 10 por ciento de los casos el olor surge principalmente de la nariz, no de la boca; tiene una cualidad diferente, que una vez más puede orientar el diagnóstico del médico o del dentista. Otra posibilidad es que el olor nasal resulte de una sinusitis u otras afecciones que impidan o bloqueen el flujo mucoso. En un caso curioso, un olor del aliento no característico en una mujer de 28 años nos llevó a descubrir una pequeña cuenta que tenía dentro de la nariz desde niña. Se sabe que los niños se incrustan objetos en el interior de la nariz; se les genera entonces una descarga nasal con la que se manchan por todos lados. Cuando un niño desarrolla de repente mal olor, debe comprobarse que no tiene un cuerpo extraño en una fosa nasal. A unas amígdalas purulentas puede atribuirse hasta un tres por ciento de los casos de halitosis. Cientos de otros estados y dolencias causan en total menos del uno por ciento de los que nos encontramos. Un caso interesante, aunque raro, es el síndrome del olor a pescado. No siempre se percibe uno mismo de tal condición. El síndrome del olor a pescado, o trimetilaminuria, débese a la insuficiencia de una enzima que en condiciones normales rompe la trimetilamina, molécula con dicho olor nauseabundo.

Se halla muy extendida la creencia de que el mal aliento procede del estómago. La infrecuencia de que el estómago sea la causa tuvo una importancia fundamental en un juicio reciente en que participé como experto (*véase el recuadro* “El olor en el juzgado”). El mal aliento que se origina fuera de la boca o de las fosas nasales es, en efecto, inusual. El esófago constituye un tubo cerrado. El flujo continuo de gas o material putrefacto del estómago indica un problema de salud, como una fístula entre el estómago y el intestino o un reflujo de consideración suficiente para que ascienda el contenido del estómago. Incluso después



de haber comido ajo, la boca retiene una parte sustancial del olor agudo.

¿Por qué nos mostramos tan sensibles al mal aliento ajeno y percibimos tan mal el propio? La teoría que asegura que nos acostumbramos al mal aliento propio, parece que carece de fundamento. La investigación que hemos llevado a cabo con Ilana Eli, Ronit Bar-Ness Greenstein y otros en nuestro laboratorio ha revelado que hay sujetos capaces de valorar muestras de su propia boca de una manera objetiva cuando están fuera de la fuente originaria (por ejemplo, cuando huelen residuos extraídos de entre sus dientes con un palillo).

Puede que haya una explicación muy sencilla: expelemos el aire de la boca horizontalmente y sólo después inspiramos en sentido vertical por la nariz; por tanto, es limitada la oportunidad de que le llegue a

Las sustancias más indeseables

Compuestos producidos por las bacterias de la boca, con sus olores

Acido sulfhídrico	Huevos podridos
Metilmercaptano	Heces
Escatol	Heces
Cadaverina	Cadáveres
Putrescina	Carne en descomposición
Acido isovaleriánico	Sudor de los pies

Obsesiones olfatorias

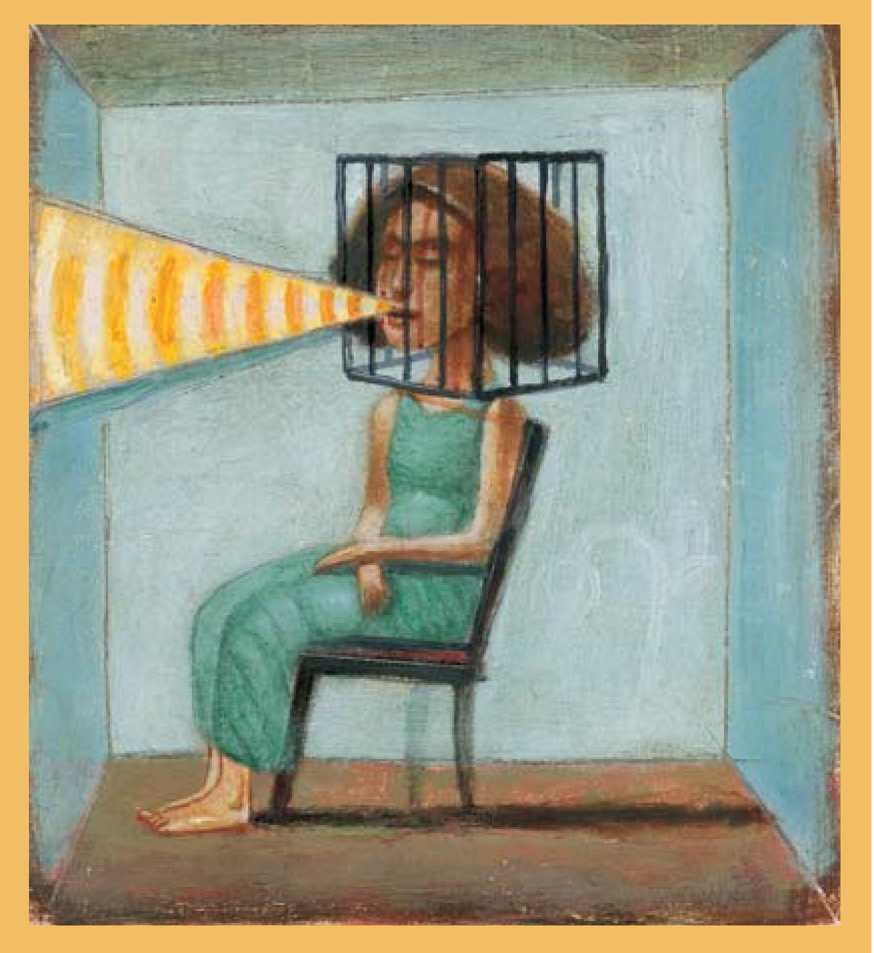
Sara (paciente imaginada a partir de diversos casos reales) viste de manera impecable y cuida su aspecto con particular esmero. Dirige un pequeño negocio y parece tenerlo todo muy bien controlado. Sólo hay un problema. Una compañera de colegio le dijo en una ocasión, hace 30 años, que tenía mal aliento. Desde aquel momento ha vivido con el temor de que la gente pueda olérselo. Así, cuando habla con los clientes lo hace a cierta distancia y masca chicle de manera incesante. Acude a la consulta del dentista con frecuencia y se limpia los dientes cuatro o cinco veces al día; se limpia la lengua, usa hilo dental y hace gárgaras con un elixir. Evita besar a su marido en la boca y estar físicamente cerca de la gente en las reuniones sociales. En la calle, cuando habla con alguien, se pone mirando al viento. Siempre se ha sentido tan cohibida por su aliento, que no le ha hablado de ello a nadie.

Un día vino a nuestra clínica y estalló en sollozos. "Tengo la sensación de que he triunfado en la vida a pesar de esta rémora", dijo. Pero cuando olimos su aliento, no detectamos ningún olor. Consultas posteriores tampoco hicieron pensar en olores sospechosos. El aliento de Sara era puro.

Sara, como millones de personas, padece halitofobia, un temor exagerado a tener halitosis. En 1997 Murray B. Stein, experto en fobias sociales, hoy en la Universidad de California en San Diego, estudió a 1206 personas en Alberta; halló que al 15,8 por ciento le preocupaba "mucho" cómo olía su aliento, que el 2,8 por ciento había consultado a un profesional al respecto y que el 2,7 por ciento decía que la inquietud por el aliento afectaba su vida de forma moderada o grave. Un uno por ciento reveló que había evitado ir a una reunión porque le preocupaba su aliento. Los halitofóbicos pueden llegar a eludir las actividades sociales y a vivir en una soledad que se imponen a sí mismos.

Entre los halitofóbicos que he entrevistado hay abogados, maestros, jueces, actores, un médico, un político e incluso alguno que se hizo dentista con la esperanza de que sus estudios le ayudarían a enfrentarse con su "problema". El halitofóbico oculta su preocupación. Un colega intentó una vez convencerme de que apenas si hay halitofóbicos. "Pero, ¿qué dices?", profirió de repente su mujer, con la que lleva casado más de 30 años. "Yo lo soy."

El halitofóbico suele pensar que tiene razones lógicas para pensar que su aliento huele. Puede interpretar que la sensación de mal sabor es un signo del mal aliento, aunque el gusto y el aliento no estén siempre relacionados. Que un miembro de la familia tenga mal aliento puede inducir a otros a concluir que han heredado el problema. Y algunos halitofóbicos viven convencidos de que tienen mal aliento porque interpretan mal el comportamiento de otros —por ejemplo, abrir una ventana o frotarse la nariz— y creen que es una reacción a su aliento. Los pocos halitofóbicos que estén dispuestos a considerar que sus temores tienen una base psicológica encontrarán a menudo ayuda en la psicoterapia. En colaboración con Ilana Eli, hemos comprobado en la Universidad de Tel Aviv que los halitofóbicos tienden a la hipersensibilidad en las interacciones interpersonales y al comportamiento obsesivo-compulsivo, según se desprende de los análisis psicológicos. La mayoría de los halitofóbicos, sin embargo, siguen buscando la curación de un problema que no padecen.



ésta una cantidad razonable. En breve, resulta difícil que percibamos nuestra propia halitosis.

Un enfoque refrescante

Aunque los compuestos azufrados volátiles, producidos por el metabolismo bacteriano, no son, ni mucho menos, los únicos factores de la halitosis, en ellos recaen las primeras sospechas. A finales de los años ochenta, nuestro grupo de investigación, con la colaboración de Jacob H. Gabbay, del Ministerio israelí del Medio Ambiente, y, luego, la de Christopher A. G. McCulloch, de la Universidad de Toronto, determinó que los sulfuros que contribuyen al mal aliento podrían calibrarse con un monitor portátil de sulfuros. Aunque el fabricante del monitor, Manny Shaw, de Interscan, se mostraba al principio bastante escéptico sobre la viabilidad comercial de sus "halímetros", ya ha vendido miles de aparatos a dentistas e investigadores. En 1999 Alfredo Sanz Medel, químico de la Universidad de Oviedo, informaba de una técnica diferente, que cuantifica de manera indirecta la concentración de sulfuros midiendo ópticamente la fluorescencia inducida por su reacción con un compuesto de mercurio.

Estas técnicas permitirán que algún día se construya un medidor eficaz de sulfuros de bolsillo. Las mediciones de los halímetros existentes guardan una correlación estadística con análisis cromatográficos más complejos y con las valoraciones de los peritos en olores humanos, que huelen en persona el aliento de los individuos estudiados y lo juzgan con fines de investigación.

Una vez se ha establecido la presencia de la halitosis, el individuo afectado desea verse libre de la afección. Por supuesto, una higiene básica de la boca con hilo dental y cepillo no puede olvidarse como excelente medio preventivo. La clorhexidina, un agente antimicrobiano que se emplea contra la gingivitis, resulta bastante eficaz contra la halitosis. Por desgracia, puede descolorar los dientes, afectar al gusto y originar ulceraciones de la boca. Estos efectos, aunque reversibles, impiden el uso de la clorhexidina más de unos días cada vez.

El origen de otros cuidados se pierde en la noche de los tiempos. La limpieza de la lengua es una práctica higiénica del Extremo Oriente que goza de popularidad y empieza a extenderse por Occidente. Un antídoto antiguo mencionado en el Talmud babilonio es el mástique, quizás el láudano del Génesis. Se trata de la resina de *Pistacia lentiscus*, o lentisco, que se cultiva aún y con el mismo objeto en la isla mediterránea de Quíos, aunque los chicles sintéticos modernos la han sustituido. Interesa señalar que se usó en el pasado para cicatrizar heridas y que hoy sabemos que tiene potentes propiedades antibacterianas. Mascar ese chicle, pues, aumenta por una parte el flujo de la saliva y destruye por otra algunos de los microbios causantes del mal aliento.

Otros productos naturales que se mascan en algunos lugares para refrescar el aliento son la cáscara de la guava (Tailandia), las semillas de anís (Extremo Oriente), el perejil (Italia), el clavo (Irak) y la canela (Brasil). Algunas de las moléculas responsables del sabor de estas plantas tienen propiedades antibacterianas, lo que da credibilidad científica a estas prácticas populares. Muchos elixires bucales muy conocidos contienen aceites olorosos, entre los que se cuentan el mentol, el eucaliptol y el salicilato de metilo (aceite de la *Gaulteria procumbens*).

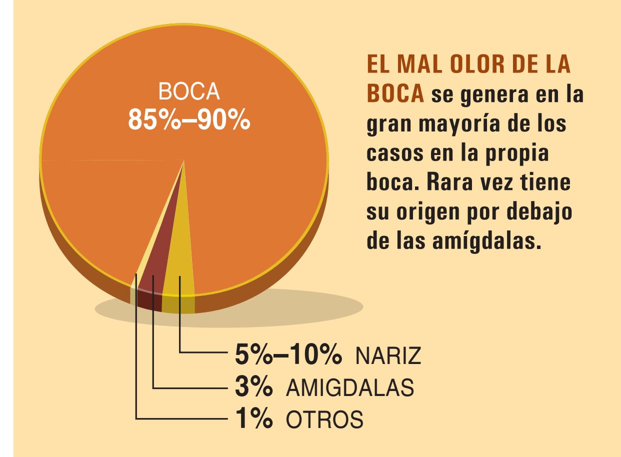


UNAS PIEDRAS PEQUEÑAS, los "amigdalitos", crecen en las criptas de las amígdalas; están constituidas por bacterias parcialmente calcificadas y otros residuos. Huelen mal de por sí, pero no siempre causan mal aliento. Son poco frecuentes (tal vez de un 2 a un 3 por ciento de la población adolescente y adulta los padece o ha padecido). Como en general no causan ningún problema médico, muchos médicos y dentistas no han oído nunca hablar de ellas. Las muestras de la izquierda corresponden a un solo individuo.

El olor en el juzgado

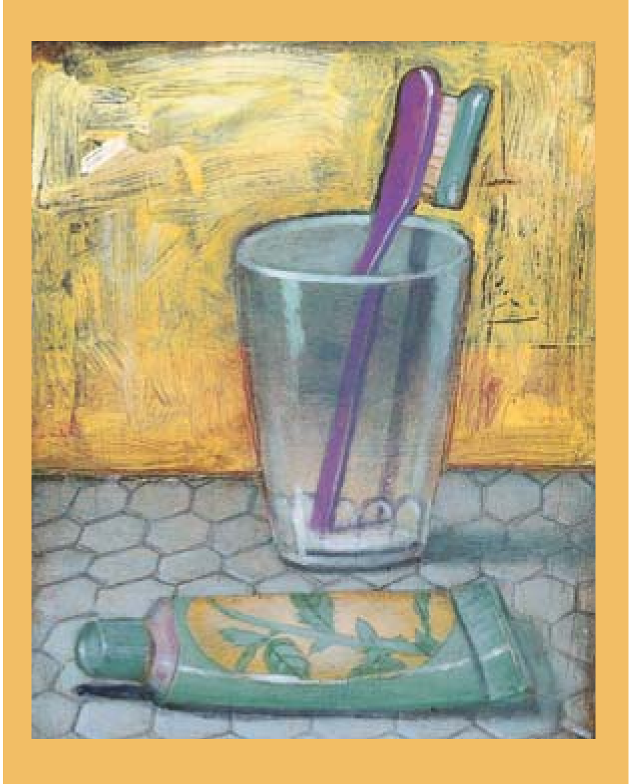
En 1999 fui perito de Warner-Lambert, fabricante de Listerine, Certs y otros productos relacionados con el aliento, en su juicio contra BreathAsure. Esta empresa comercializaba las cápsulas BreathAsure, de las que decía que combatían internamente el mal aliento. Warner-Lambert sostenía que los nombres registrados de los productos de BreathAsure "incurrían en falsedad al dar a entender que aliviaban el mal aliento y proporcionaban con ello una ventaja injusta al querellado". Un tribunal de apelaciones de Estados Unidos falló a favor de Warner-Lambert, entre otras razones porque la ciencia no respaldaba las aseveraciones de BreathAsure de que la halitosis tenía una fuente interna.

SITIOS DONDE SE ORIGINA EL MAL ALIENTO



EL MAL OLOR DE LA BOCA se genera en la gran mayoría de los casos en la propia boca. Rara vez tiene su origen por debajo de las amígdalas.

Consejos para mantener un buen aliento



- Limpie delicadamente la parte posterior de la lengua con un limpiador lingual de plástico. Tenga cuidado de no herir la lengua; arrastre sólo la capa de moco. La práctica ayuda a evitar las arcadas.
- Tome un buen desayuno; así limpia la boca y mantiene el flujo de saliva.
- Evite la sequedad de la boca. Mascar chicle unos minutos puede reducir el mal aliento. Beba líquidos en cantidad suficiente.
- Use un elixir. El método más eficaz es enjuagarse la boca y hacer gárgaras justo antes de acostarse. Esto evita la multiplicación de microorganismos durante la noche.
- Límpiese la boca después de ingerir bebidas o alimentos olorosos, como el ajo, la cebolla, el curry o el café. Asegúrese de que limpia bien entre los dientes, sobre todo después de ingerir alimentos o líquidos ricos en proteínas.
- Cepíllese y use hilo dental según las instrucciones de su dentista.
- Pregunte a algún miembro adulto de su familia o a un buen amigo sobre su aliento. Es el modo más fiable de averiguar si tiene halitosis.

La Asociación Odontológica Americana se basa en unas directrices para aprobar o no los productos que se presentan como remedios eficaces de la placa dentaria, la gingivitis o la caries. Ahora está revisando las que aplicará a los que refrescan el aliento. Si se presta atención a los detalles, se comprenderá que la aprobación requerirá mejores productos: la mayoría de los disponibles sólo protegen el aliento durante un período breve, de 20 a 120 minutos, y es muy probable que la Asociación exija un efecto más duradero para otorgar su reconocimiento oficial. Por ejemplo, suele considerarse que la menta constituye un buen ingrediente para tratar el aliento, pero adolece de debilidad y brevedad en la duración de los efectos cuando se la compara con otros aceites esenciales.

En los últimos 15 años he tenido la oportunidad de oler la boca de millares de individuos en clínicas y durante investigaciones, por no mencionar los centenares que he olfateado de manera subrepticia en los supermercados, en los aviones o en la sinagoga el día de ayuno del Yom Kippur. De igual manera que el queso Camembert huele distinto que el Edam, el mal aliento no es un olor, sino toda una constelación; depende de qué microorganismos se hallen implicados, de dónde procedan y qué hayan estado haciendo. Mientras los científicos siguen debatiendo sobre la mejor forma de cuantificar un mal aliento, las futuras narices electrónicas quizá proporcionen no sólo niveles de halitosis, sino una indicación de los tipos de olores detectados, lo que daría pistas sobre sus orígenes.

Poder identificar esos orígenes reviste una importancia considerable en la investigación de la halitosis y a la hora de aconsejar a los pacientes; requiere una amplia experiencia olfativa. Hay aún mucho que desconocemos. De entrada, habrá que emparejar especies bacterianas y olores. Los detalles de la contribución de los conductos nasales y las amígdalas al mal aliento se encuentran todavía en la penumbra. Aunque el reconocimiento y tratamiento de la halitosis quizá parezca de escasa importancia cuando se piensa en otras afecciones, puede ejercer un efecto profundo en la vida de una persona.

Bibliografía complementaria

PRODUCTION AND ORIGIN OF ORAL MALODOR: A REVIEW OF MECHANISMS AND METHODS OF ANALYSIS. J. Tonzetich en *Journal of Periodontology*, vol. 48, n.º 1, págs. 13-20, enero de 1977.

WHAT TO DO ABOUT HALITOSIS. C. Scully, S. P. Porter y J. Greenman en *British Medical Journal*, vol. 308, págs. 217-218; 22 de enero de 1994.

CLINICAL ASSESSMENT OF BAD BREATH: CURRENT CONCEPTS. M. Rosenberg en *Journal of the American Dental Association*, vol. 127, págs. 475-482, abril de 1996.

BAD BREATH: RESEARCH PERSPECTIVES. Segunda edición. Dirigido por M. Rosenberg. Ramot Publishing, Tel Aviv University, 1997.

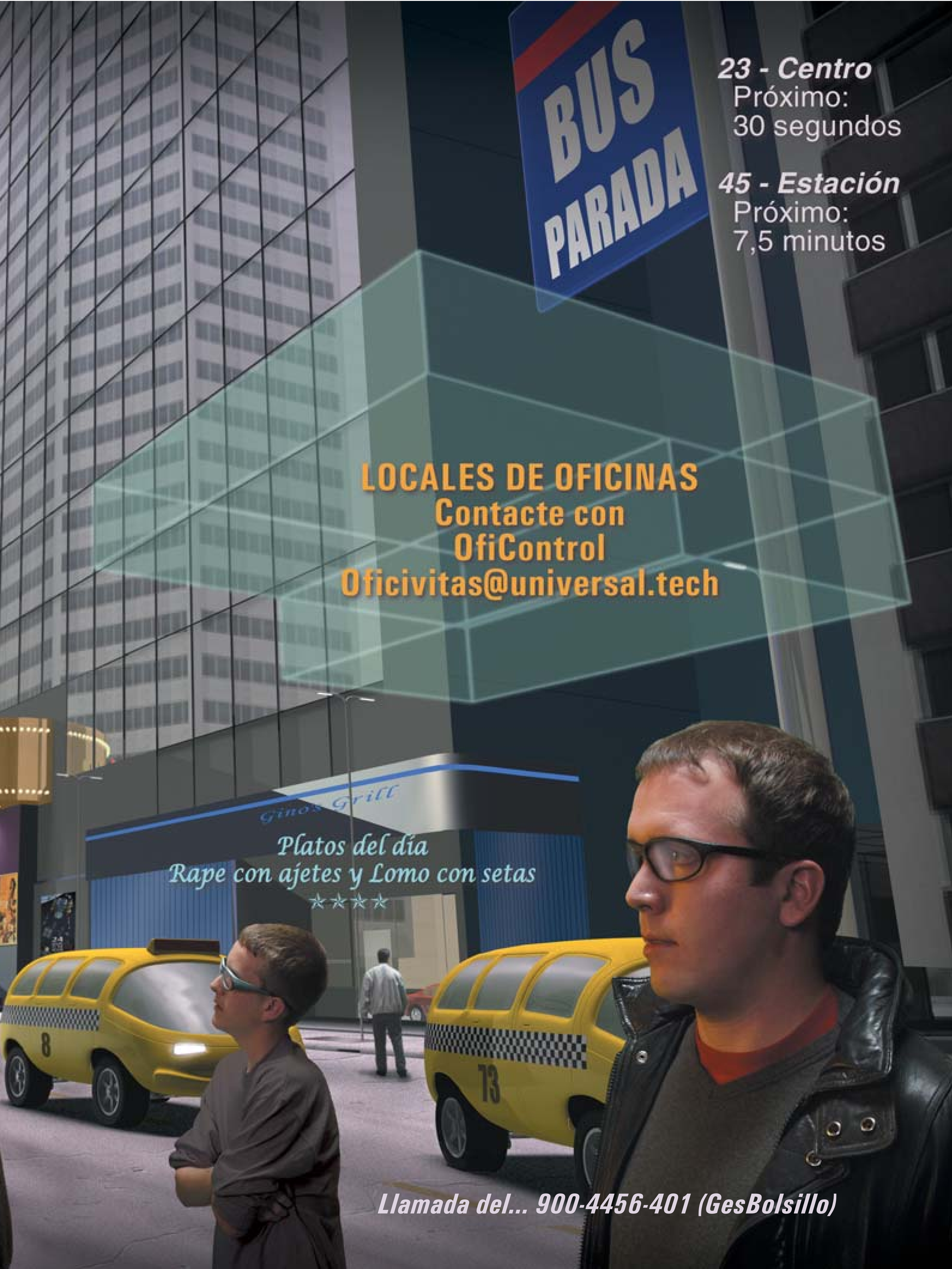
Una nueva forma de visión: la realidad complementada

Los informáticos están desarrollando sistemas que pueden ensanchar y enriquecer la visión del mundo

Steven K. Feiner



VISUALIZACIÓN TRANSPARENTE de una calle, tal y como la imagina un artista, según un sistema de RC que podría entrar en servicio a finales del decenio. Gráficos y textos recibidos desde una red inalámbrica (horarios de autobuses y anuncios de películas) se superponen en el visualizador sobre los objetos correspondientes del campo visual del usuario (la parada del autobús y el cine).


BUS
PARADA
23 - Centro
Próximo:
30 segundos
45 - Estación
Próximo:
7,5 minutos
LOCALES DE OFICINAS
Contacte con
OfiControl
Oficivitas@universal.tech
Ginos Grill
Platos del día
Rape con ajetes y Lomo con setas
★★★★
8
73
Llamada del... 900-4456-401 (GesBolsillo)

¿Qué aspecto tendrán dentro de diez años las interfaces de ordenador? No hay dificultad en imaginar, por extrapolación de los sistemas actuales, toda una serie de visualizadores de alta resolución, desde equipos diminutos de mano o de pulsera hasta grandes pantallas integradas en el propio escritorio, en la pared o en el suelo. Serán, sin duda, cosa corriente. No obstante, el autor y otros informáticos están convencidos de que una interfaz de carácter radicalmente nuevo será la que ejerza un efecto más profundo en cómo vamos a desarrollar los futuros ordenadores e interactuar con ellos.

Los sistemas de "realidad complementada" (RC) comprenden dispositivos de visualización computarizados que añaden información virtual a las percepciones sensoriales del usuario. Casi toda la investigación en RC se centra en visualizaciones que se transparentan (*see-through*): el usuario se coloca, por lo general en la cabeza, un visualizador que superpondrá gráficos o textos a la imagen que el sujeto reciba de cuanto le rodea. (La información virtual puede llegar también a través de otros sentidos, como el oído o el tacto, pero en este artículo nos centraremos en los refuerzos visuales.) Los sistemas de RC han de conocer en todo momento la posición y la orientación de la cabeza del usuario, para que lo superpuesto quede alineado con la imagen del mundo que el sujeto recibe. Merced a este proceso, llamado "registro", los programas gráficos pueden situar una imagen tridimensional de una taza de té, por ejemplo, sobre la de un platillo real, y mantener la taza virtual fija en esa posición mientras el usuario se mueve por la sala. Los sistemas de RC se valen en parte de los mismos equipos utilizados en la investigación de la realidad virtual, pero con una diferencia crucial: la realidad virtual tiene la pretensión de sustituir al mundo real; la complementada se limita a añadirle algo.

Veamos cosas que con la RC serían rutinarias. Un técnico, al examinar un equipo averiado, vería al mismo tiempo unas instrucciones que resaltasen las piezas que es necesario inspeccionar. El cirujano tendría, a todos los efectos, una mirada de rayos X porque se le presentarían, proyectados sobre el paciente, los barridos con ultrasonidos de los órganos internos. Los bomberos verían la disposición interna de un edificio en llamas y evitarían así riesgos que de otro modo serían invisibles. Los soldados observarían las posiciones de los tiradores enemigos previamente localizados por aviones no tripulados de reconocimiento. Un turista echaría una ojeada a una calle y encontraría una reseña de cada uno de los restaurantes de esa manzana.

La clave de todas estas aplicaciones consiste en ofrecer la información necesaria en el lugar preciso y en el momento justo. Los ayudantes digitales personales, como el Palm o el Pocket PC, pueden facilitarnos información oportuna por medio de redes inalámbricas y de receptores del GPS (sistema de posicionamiento global) que sigan sin cesar la ubicación de esos dispositivos de mano. Pero lo que confiere a la realidad complementada su carácter peculiar es la forma en que se ofrece tal información: no en una pantalla aparte, sino integrada en las percepciones del usuario. Tal tipo de interfaz hace mínimo el esfuerzo mental adicional necesario para trasladar una y otra vez la atención entre las tareas del mundo real y la pantalla de un ordenador. En la realidad complementada, la imagen del mundo que tiene el usuario y la de la interfaz del ordenador se funden en una sola.

Aunque la realidad complementada pueda parecer cosa de ciencia-ficción, los investigadores llevan construyendo prototipos desde hace 30 años. A finales del decenio de 1960 elaboraron el primero uno de los pioneros del grafismo informático, Ivan Sutherland, y sus alumnos de las universidades de Harvard y de Utah. Entre 1970 y 1990, un pequeño número de investigadores estudió la realidad complementada en el Laboratorio Armstrong, de la Fuerza Aérea estadounidense, en el Centro Ames de Investigación, de la NASA y en la Universidad de Carolina del Norte en Chapel Hill. La expresión "realidad complementada" fue acuñada a principios de los años noventa por unos científicos de Boeing que estaban desarrollando un sistema experimental de RC para facilitar a los operarios la tarea de instalar mazos de cables. La investigación en RC floreció vigorosamente a lo largo del decenio pasado cuando los precios de los equipos necesarios se redujeron hasta quedar al alcance de los laboratorios. Desde 1998, los investigadores de la RC vienen celebrando congresos anuales.

A pesar de los cambios espectaculares que han experimentado las técnicas informáticas desde los trabajos iniciales de Sutherland, los componentes esenciales para la construcción de un sistema de RC han seguido siendo los mismos: visualizadores, seguidores de posición y orientación, computadoras y programas gráficos. El rendimiento de todos estos componentes ha mejorado notoriamente en los últimos años, haciendo posible el diseño de sistemas experimentales que tal vez puedan pronto transformarse en productos comerciales.

Resumen/*Realidad complementada*

- Los sistemas de realidad complementada (RC) añaden información generada por ordenador a las percepciones sensoriales del usuario. La realidad virtual trata de reemplazar al mundo real; la complementada, de enriquecerlo.
- La mayoría de las investigaciones se centra en dispositivos "transparentes", que se llevarían en la cabeza, donde gráficos y texto se superponen sobre la imagen del mundo del usuario.
- Los recientes avances técnicos pueden desembocar pronto en sistemas de RC para cirujanos, técnicos de mantenimiento, soldados, turistas y juegos de ordenador. Podrían acabar siendo ubicuos.

LA VISUALIZACION TRANSPARENTE OPTICA

Sobre la imagen que el usuario recibe del mundo se superponen, mediante sistemas ópticos, gráficos generados por ordenador. En este diseño actual, el prisma lleva los gráficos de una pantalla de cristal líquido a la línea de visión del usuario sin impedir el paso de la luz del mundo circundante. Un sistema de sensores y dianas determina la posición y orientación de la cabeza para que los gráficos aparezcan en los lugares debidos. Pero en los sistemas actuales los gráficos no consiguen ocultar por completo los objetos situados tras ellos.

VISUALIZADOR DE CRISTAL LIQUIDO

PRISMA CON SUPERFICIE DE FORMA LIBRE

VISUALIZADOR Y SENSORES DE SEGUIMIENTO

PRISMA COMPENSADOR

DIANAS DE SEGUIMIENTO

ARAÑA VIRTUAL

ORDENADOR

1 Imagen del mundo real desde la perspectiva de un videojugador

2 Gráficos sintetizados por el sistema de realidad complementada

3 Imagen en el visualizador transparente, con los gráficos superpuestos

Ver es creer

Por definición, la visualización transparente de los sistemas de RC ha de presentar una combinación de informaciones reales y virtuales. Aunque los visualizadores pueden ser estacionarios o de mano, lo más frecuente es que se lleven en la cabeza. Una pantalla de pequeñas dimensiones reales, situada con precisión delante del ojo, puede crear una imagen de grandes dimensiones aparentes. Se distinguen dos tipos, el "óptico" y el de "vídeo". Un método sencillo de construir un visualizador transparente óptico es el que se vale de un divisor de haz, un espejo semiplateado que en parte transmite y en parte refleja la luz, situado ante el ojo con la orientación precisa para llevar por reflexión la imagen de una pantalla de ordenador hasta la línea de visión del usuario; al mismo tiempo, se deja pasar la luz del mundo exterior. Estos partidores de haz, llamados "combinadores", se están usando desde hace tiempo en los cascos de los pilotos militares (y más recientemente, en automóviles de lujo). Un sistema de lentes interpuestas entre el divisor de haz y la pantalla del ordenador permite enfocar la imagen de modo que se haga cómoda su visión. Si cada ojo tiene un sistema así, se logra una visión estereoscópica (*véase el recuadro* "La visualización transparente óptica").

La visualización transparente de vídeo utiliza, en cambio, técnicas de mezcla y fusión de imágenes, inicialmente desarrolladas para efectos especiales de televisión: se combina la imagen tomada por una cámara, que se lleva en la cabeza, con gráficos sintéticos (*véase el recuadro* "La visualización transparente con videocámara"). La imagen fundida aparece de ordinario sobre una pantalla opaca en un visualizador de cabeza. Con un diseño cuidadoso se logra que la línea de toma de la cámara sea muy próxima a la de visión del ojo del portador; la imagen de vídeo se aproxima, pues, a la que el sujeto vería normalmente. Al igual que con los visualizadores ópticos, se obtiene una visión estereoscópica duplicando el sistema.

En uno de los métodos de combinación de imágenes para los visualizadores de vídeo, los gráficos sintetizados se disponen contra un color de fondo reservado para ese fin. Los píxeles de la imagen de la videocámara se comparan, uno por uno, con los correspondientes píxeles de los gráficos sintéticos. Un píxel de la cámara es presentado en el visualizador sólo cuando el píxel del gráfico contiene el color de fondo. Si no, se muestra el píxel del gráfico; éste, pues, ocultará los objetos reales que estén situados detrás. O un canal aparte, con la información almacenada en cada píxel, puede indicar la fracción de píxel que ha de quedar determinada por la información virtual; esta técnica permite la presentación de gráficos traslúcidos. Y si el sistema es capaz de determinar las distancias que hay entre los objetos reales y el observador, ciertos algoritmos para gráficos informáticos crearán la ilusión de que los objetos reales están ocultando objetos virtuales situados más allá. (Los visualizadores ópticos cuentan también con esta posibilidad.)

Cada uno de estos métodos tiene sus pros y sus contras. Mediante los sistemas transparentes ópticos, el usuario ve el mundo con resolución y apertura de campo máximos. Pero los gráficos superpuestos de los sistemas actuales no son opacos, no pueden ocultar del todo los objetos reales situados tras ellos; por tanto, el texto superpuesto resultará difícil de leer contra ciertos fondos y los gráficos tridimensionales quizá no produzcan una ilusión de volumen convincente. Por otra parte, cuando miramos objetos reales, los enfocamos de distinto modo según la distancia a que se encuentren; los objetos virtuales, en cambio, están todos enfocados sobre el plano del visualizador. Por esa razón, puede que un objeto virtual que deba encontrarse en la misma ubicación que un objeto real tenga una proyección geométricamente correcta y, no obstante, el observador no logre ver enfocados ambos al mismo tiempo.

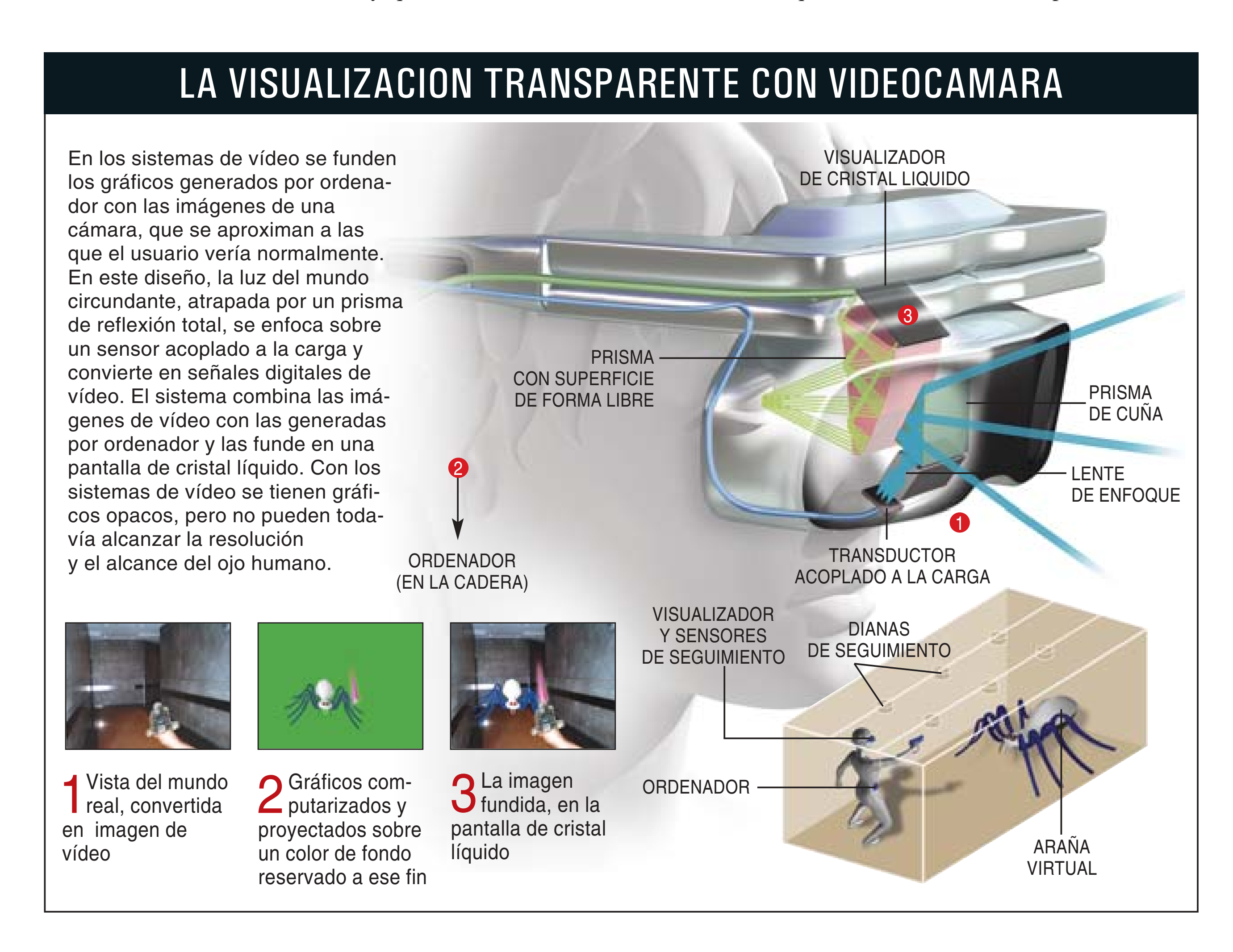
En los sistemas de vídeo, los objetos virtuales pueden tapar completamente a los objetos reales y combinarse con ellos merced a una rica variedad de efectos gráficos. No existe discrepancia entre la forma en que el ojo enfoca los objetos virtuales y los materiales, pues se ven ambos en el mismo plano. Sin embargo, las limitaciones de la técnica de vídeo actual entrañan que la calidad de la experiencia visual del mundo real desmerezca mucho y quede al nivel de los gráficos sintetizados, todo enfocado a una misma distancia aparente. En la actualidad, los sistemas de cámara y visualizador no admiten parangón con el ojo humano.

Los primeros dispositivos diseñados por Sutherland y sus alumnos eran artefactos incómodos, provistos de tubos de rayos catódicos y de voluminosos juegos de lentes. En la actualidad, los diseñadores se valen de pequeñas pantallas de cristal líquido y de técnicas ópticas punteras; crean de esa forma sistemas que no pesan más que unas decenas de gramos. Son más los adelantos que ya están en camino. Por ejemplo, un fabricante, Microvision, ha desarrollado un dispositivo que proyecta directamente sobre la retina del ojo, mediante láseres de baja potencia, imágenes de barrido. Algunos prototipos de visualizadores de cabeza se parecen mucho a unas gafas, por lo que no llaman demasiado la atención. Otro método se basa en la proyección directa de los gráficos sobre superficies del ambiente del usuario.

Seguir el rastro

Los sistemas de realidad complementada exigen, y esto es crucial, una concordancia exacta entre los gráficos superpuestos y la imagen que tenga el usuario del mundo que le rodea. Para hacer posible tal re-

LA VISUALIZACION TRANSPARENTE CON VIDEOCAMARA



En los sistemas de vídeo se funden los gráficos generados por ordenador con las imágenes de una cámara, que se aproximan a las que el usuario vería normalmente. En este diseño, la luz del mundo circundante, atrapada por un prisma de reflexión total, se enfoca sobre un sensor acoplado a la carga y convierte en señales digitales de vídeo. El sistema combina las imágenes de vídeo con las generadas por ordenador y las funde en una pantalla de cristal líquido. Con los sistemas de vídeo se tienen gráficos opacos, pero no pueden todavía alcanzar la resolución y el alcance del ojo humano.

lación espacial, el sistema de RC ha de ir siguiendo y determinando con precisión la posición y la orientación de la cabeza del usuario, para utilizar tal información al presentar los gráficos. Algunos sistemas de RC han de seguir también ciertos objetos en movimiento; por ejemplo, un sistema que le proporcione ayuda visual a un mecánico que está reparando un motor a reacción habrá de ir tomando nota de las posiciones y orientaciones de las piezas del motor durante el desmontaje. Dado que los dispositivos de seguimiento siguen de ordinario la pista de seis parámetros para cada objeto —tres coordenadas espaciales y tres ángulos de orientación— es frecuente denominarlos "seguidores de seis grados de libertad".

En sus prototipos, Sutherland y sus colegas experimentaron con un seguidor mecánico de la cabeza que se hallaba suspendido del techo. Probaron también con seguidores ultrasónicos, que se valían de señales acústicas para determinar la posición del usuario. Desde entonces, se han desarrollado versiones perfeccionadas de estas técnicas, amén de sistemas de seguimiento de tipo electromagnético, óptico o de vídeo. Los seguidores constan de dos partes: una que porta la persona sometida a seguimiento y otra integrada en el ambiente circundante, por lo general en la misma sala. En el caso de los seguidores ópticos, se pueden adherir las dianas —diodos fotoluminiscentes o catadiópticos, por ejemplo— al objeto o persona seguido e insertar una matriz de sensores ópticos en el techo de la sala. O bien, puede ser el usuario el portador de los sensores y quedar las dianas fijas al techo. Los sensores determinan entonces la posición y la orientación del usuario calculando las distancias a cada una de las dianas.

En la vida diaria, las personas se basan en diversas percepciones (entre ellas, lo que ven, ciertas indicaciones del oído interno y la atracción gravitatoria sobre sus cuerpos) para tener conciencia de su posición y movimiento. De forma similar, los "seguidores híbridos" se fundan en diversas fuentes de información sensorial. Por ejemplo, el portador de un visualizador de RC puede llevar sensores inerciales (giróscopos y acelerómetros) que registren los cambios en la orientación de la cabeza. Al combinar esta información con datos tomados de los dispositivos ópticos, de vídeo o ultrasónicos, se mejora en gran medida la precisión del seguimiento.

El autor

STEVEN K. FEINER es profesor de ciencias informáticas en la Universidad de Columbia cuyo laboratorio de grafismo e interfaces de usuario dirige. Se doctoró en ciencias de la computación en la Universidad Brown en 1987. Además de investigar los programas e interfaces de realidad complementada, desarrolla sistemas que automaticen el diseño y disposición de los gráficos interactivos y las presentaciones multimedia en dominios que van de la medicina a las bases de datos gubernamentales. Costearon en parte las investigaciones descritas en este artículo la Oficina de Investigaciones Navales y la Fundación Nacional de Ciencias de los EE.UU.



Pero, ¿y los sistemas de RC para uso en el exterior? ¿Cómo se sigue a una persona que abandona una sala repleta de sensores? El sistema de uso a cielo abierto diseñado por nuestro laboratorio de la Universidad de Columbia gestiona por separado los seguimientos de la posición y de la orientación. La orientación de la cabeza se determina mediante un seguidor híbrido, disponible comercialmente, que combina giróscopos y acelerómetros con un magnetómetro que mide el campo magnético terrestre. Para el seguimiento de la posición nos servimos de una versión de alta precisión del cada vez más popular receptor del sistema de posicionamiento global (GPS).

Los receptores del GPS determinan el lugar donde se encuentran por medio de señales de radio procedentes de satélites de navegación. La precisión de los receptores manuales, económicos que están disponibles en la actualidad es bastante burda —los errores pueden ser de metros—. Se pueden lograr mejores resultados mediante el GPS diferencial. En este método, el receptor móvil del GPS se vale simultáneamente de las señales de otro receptor del GPS y de las de una emisora de radio, fija con respecto a la Tierra. Esta emisora difunde correcciones basadas en la discrepancia entre la ubicación, conocida, de la antena del GPS fija y las posiciones calculadas. Apoyándose en estas señales para corregir las del satélite, el GPS diferencial puede reducir el margen de error a menos de un metro. Nuestro sistema consigue resoluciones centimétricas utilizando un GPS cinemático en tiempo real, una variante más refinada del GPS diferencial que compara también las fases de las señales de receptores fijos y móviles.

Desafortunadamente, el sistema GPS no constituye la solución definitiva del problema del seguimiento de la posición. Las señales de los satélites son bastante débiles y es fácil que las bloqueen los edificios e incluso el follaje. Queda así descartada la posibilidad de un seguimiento útil en interiores o en el centro de ciudades donde buena parte del cielo esté oculta por edificios altos. Hemos comprobado que el seguimiento con GPS funciona bien en la porción central del recinto de la Universidad de Columbia, que cuenta con amplios espacios y edificios más bien bajos. Por otra parte, el GPS proporciona un número demasiado reducido de actualizaciones por segundo y resulta demasiado impreciso para la superposición exacta de gráficos sobre los objetos cercanos.

Los sistemas de realidad complementada exigen muchísimo a las técnicas de seguimiento en lo tocante a la precisión, la resolución, la velocidad y la frecuencia de repetición. Los equipos y los programas introducen demoras entre el movimiento del usuario y la actuali-

zación de la información expuesta. En consecuencia, los objetos virtuales dejan de permanecer en las posiciones debidas cuando el usuario se desplaza o mueve la cabeza. Una de las técnicas para combatir tales errores consiste en equipar a los sistemas de RC con programas que pronostiquen a corto plazo los futuros movimientos del usuario por extrapolación de los movimientos anteriores. Y, a la larga, es posible que sistemas de sensores híbridos, provistos de técnicas de visión computarizada, consigan efectuar las superposiciones gráficas apropiadas cuando los dispositivos reconozcan ciertos objetos en lo que el usuario esté viendo.

Gestión de la realidad

El rendimiento de los sistemas gráficos, lo mismo en equipos que en programas, ha mejorado de forma espectacular en los últimos años. En los años noventa, nuestro laboratorio tuvo que construirse sus propias computadoras para el sistema de RC de exteriores; no existía ningún ordenador portátil comercial capaz de producir con velocidad suficiente los gráficos tridimensionales necesarios. En 2001, sin embargo, pudimos finalmente pasarnos a un portátil comercial con una capacidad gráfica suficiente. Para nuestros sistemas de exterior, lo montamos en una mochila. Tiene la ventaja de que su pantalla es grande.

Parte de lo que confiere a lo real sensación de realidad es su incesante estado de flujo. Los programas de RC han de estar actualizando sin cesar el grafismo superpuesto conforme se desplaza el usuario o lo hacen los objetos que hay a su alrededor. Utilizo la expresión "gestión del entorno" para describir el proceso de coordinar la presentación de un gran número de objetos virtuales en muchos visualizadores y para muchos usuarios. En colaboración con Simon J. Julier, Larry J. Rosenblum y otros investigadores del Laboratorio Naval de Investigaciones, estamos desarrollando una arquitectura informática que resuelva este problema. Supongamos que quisiéramos mostrar nuestro laboratorio a un visitante e irle comentando lo que va viendo. Para ello sería necesario seleccionar qué partes del laboratorio se deben comentar, determinar cómo serían los comentarios —rótulos, digamos— y calcular la posición y el tamaño de cada uno. Nuestro laboratorio ha desarrollado prototipos de programas que rediseñan interactivamente la geometría de los objetos virtuales con el fin de mantener las relaciones deseadas entre ellos y los objetos reales que haya ante la mirada del visitante. Tales programas pueden, por ejemplo, recalcular sin cesar la posición y el tamaño de los rótulos para asegurar que son siempre visibles y se superponen sólo al objeto adecuado.

Importa señalar que un número notable de útiles aplicaciones de la RC requieren sólo una potencia grá-

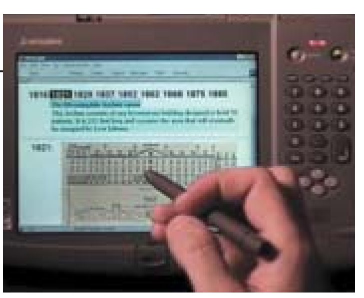
REALIDAD COMPLEMENTADA: ATISBOS

El Laboratorio de Grafismo e Interfaces de Usuario de la Universidad de Columbia ha construido un sistema experimental de uso a cielo abierto destinado a facilitarle la exploración del campus a un visitante. El ordenador portátil que el usuario carga en sus espaldas suministra los gráficos que se superponen en una visualización transparente óptica. La ubicación del usuario es detectada mediante receptores del GPS.





El laboratorio preparó un documental histórico que ofrece imágenes tridimensionales del manicomio de Bloomingdale, que se alzaba en otros tiempos en los terrenos de la actual universidad.



El usuario que está viendo el documental puede obtener información complementaria con una pantalla de mano, que facilita una línea cronológica interactiva de la historia del manicomio.



UNOS INVESTIGADORES de la Universidad Central de Florida han ideado una aplicación a la medicina. El sistema superpone un modelo de la articulación de la rodilla en la imagen de la pierna de una paciente. La posición de la pierna se determina mediante fotodiodos emisores de infrarrojos. Los gráficos permiten ver el movimiento de los huesos al doblar la pierna.

fica bastante pequeña: ya somos capaces de ver el mundo real sin necesidad de representarlo informáticamente (la realidad virtual, por el contrario, tiene siempre que crear un escenario tridimensional para el usuario). En un sistema diseñado para la reparación de equipos, una simple flecha o un recuadro realzado pueden bastar para indicar el paso siguiente en un complicado procedimiento de mantenimiento. En cualquier caso, para que la RC móvil resulte práctica, los ordenadores y sus fuentes de alimentación han de ser pequeños y cómodos de llevar.

La máquina de Touring y MARS

Muchos diseños de RC se han centrado en el desarrollo de visualizadores y sistemas de seguimiento más perfectos; nuestro laboratorio, en cambio, se ha dedicado al desarrollo de la interfaz de usuario y de la infraestructura de programación. Tras experimentar a principios de los años noventa con sistemas de RC de uso en espacios cubiertos, en 1996 decidimos construir nuestro primer sistema para el exterior; queríamos averiguar qué clase de ayuda podría prestar a un turista que explorase un ambiente desconocido. Llamamos "máquina de Touring" a nuestro primer proyecto. Deseábamos hacer mínimas las restricciones impuestas por el estado de la técnica: combinamos los mejores componentes que encontramos con el fin de crear un banco de pruebas cuyas capacidades se acercasen lo más posible a las máquinas, más poderosas, que cabe esperar haya en el futuro. Dejamos de lado consideraciones prácticas, el costo, el tamaño, el peso o el consumo de energía, en la confianza de que estos problemas serán superados en años próximos por los diseñadores de equipos. Sacrificando la comodidad de uso a cambio del rendimiento y facilidad de desarrollo de la programación, hemos construido varias generaciones de prototipos instalados en mochilas con armazón externo. En general, damos a estos sistemas de RC portátiles el nombre de MARS, acrónimo de "sistemas portátiles de realidad complementada" (*véase el recuadro* "Realidad complementada: atisbos").

Nuestro sistema actual se vale de correas y de un tablero recubierto de velcro para sujetar muchos de los componentes: el ordenador portátil (con su chip de gráficos tridimensionales y tarjeta IEEE 802.11b de red inalámbrica), los seguidores (un receptor GPS cinemático en tiempo real, un receptor GPS de correcciones y la caja de interfaces para el seguidor de orientación híbrido), la alimentación (baterías y una fuente de voltaje constante) y cajas de interfaz para los visualizadores de la cabeza y los dispositivos de interacción. El peso total es de unos 11 kilos. Las antenas del receptor GPS y del receptor de correcciones del GPS están montadas sobre el armazón de la mochila. El usuario se pone el visualizador transparente de cabeza y el sensor de orientación anexo. Nuestros prototipos MARS permiten a los usuarios la interacción con el visualizador —por ejemplo, moverse por un menú de posibilidades proyectado ante la vista del usuario— manipulando un sensor, de bola o que responda al tacto, con conexión inalámbrica.



Desde un principio, nuestro sistema disponía también de una pantalla de mano (donde se marcan las opciones con un estilo) para complementar el visualizador transparente de la cabeza. Esta interfaz híbrida ofrece las ventajas de ambos tipos de interacción: el usuario puede ver gráficos tridimensionales en el visualizador transparente y al mismo tiempo acceder a información adicional en la pantalla de mano.

En colaboración con John Pavlik y su grupo de la Universidad de Columbia, hemos explorado la forma en que nuestros prototipos MARS pueden incrustar "documentales localizados" en el ambiente circundante. Estos documentales narran acontecimientos históricos acaecidos en las inmediaciones superponiendo gráficos de tres dimensiones y sonido sobre lo que el usuario observa y oye. Desde el reloj de sol de Columbia, si mira a través del visualizador de cabeza, el usuario verá banderas virtuales izadas por el recinto universitario; cada una representa varias secciones de la narración ligadas a su ubicación. Cuando el usuario selecciona una bandera y elige seguidamente una de las secciones, ésta le es ofrecida tanto en el visualizador de cabeza como en las pantallas de mano.

Uno de nuestros documentales "localizados" refiere la historia de las manifestaciones estudiantiles de 1968 en Columbia. Si el usuario selecciona una de las banderas virtuales, el visualizador de cabeza presenta un conjunto de imágenes fijas, acompañadas de una narración, mientras la pantalla de mano muestra cortometrajes de vídeo y proporciona información más detallada sobre incidentes y participantes concretos. En nuestro documental sobre el manicomio de Bloomingdale, que ocupó lo que es hoy la Universidad de Columbia, se pueden ver modelos tridimensionales de los edificios de que constaba (demolidos hace mucho) en sus ubicaciones originales, superpuestos en la visualización transparente. Mientras, la pantalla de mano ofrece una línea cronológica anotada e interactiva de la historia del hospital. Al ir el usuario eligiendo diferentes fechas en la línea cronológica, las imágenes de los edificios que existían por entonces aparecen o desaparecen en la visualización.

La aplicación decisiva

Dado que se perfeccionan sin cesar los componentes de seguimiento, presentación y procesamiento móvil en los sistemas de RC, quizá no sólo llegue a ser posible la integración impecable de la información sensorial y la virtual, sino corriente. Ciertos observadores han sugerido que alguna de las muchas aplicaciones que la realidad complementada pudiera tener

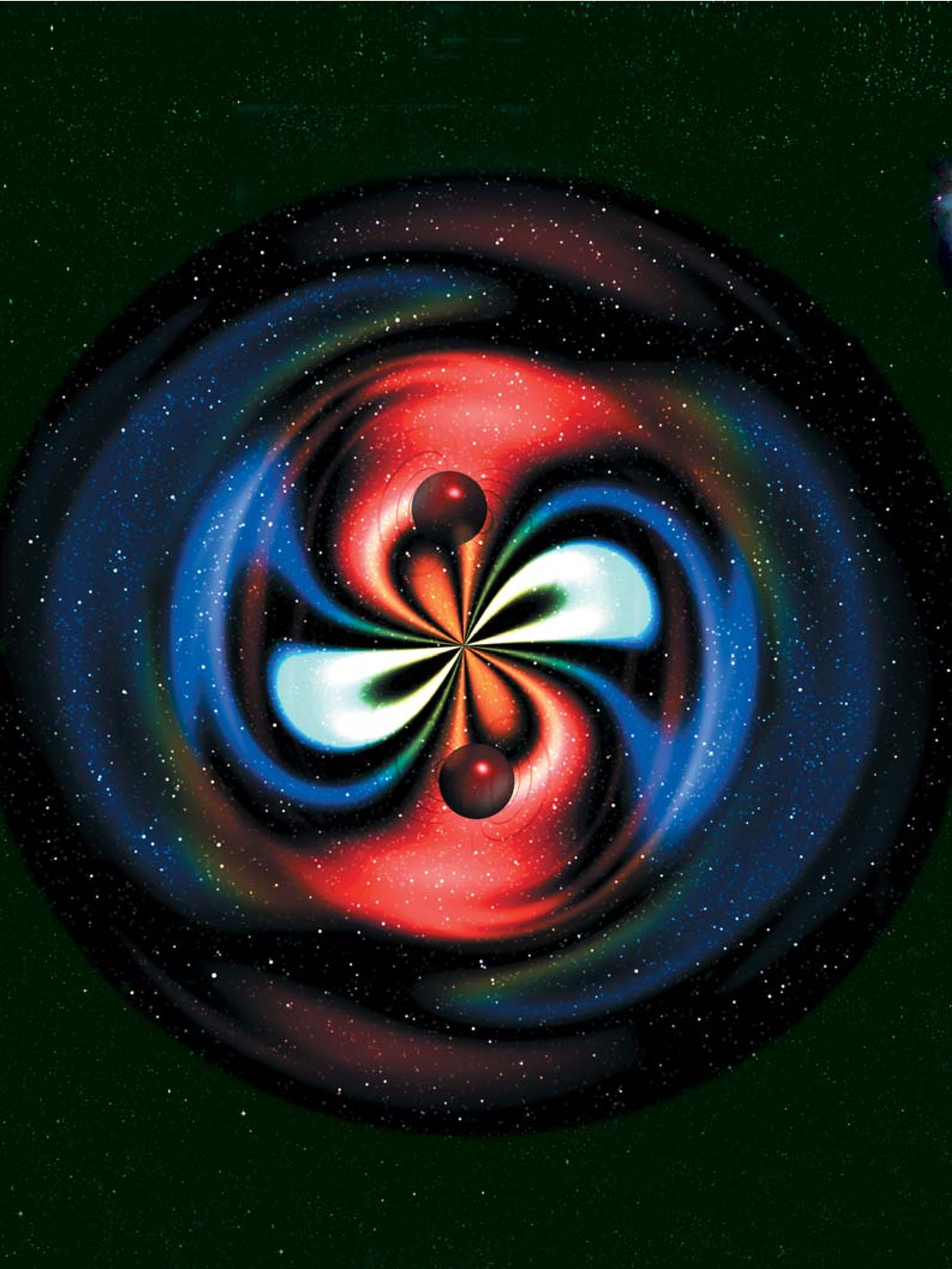
(juegos informáticos, mantenimiento de equipos, imágenes para uso médico u otras todavía no ideadas) podría convertirse en la aplicación decisiva, tan necesaria y útil que determinase la adopción masiva de esta técnica. Aunque las aplicaciones concretas puedan ser una fuerza motriz cuando los sistemas comerciales de RC empiecen a estar disponibles, en mi opinión éstos acabarán siendo como los teléfonos y los ordenadores personales: hoy tan familiares, no tienen una aplicación predominante, sino una plétora de usos cotidianos.

La idea de que los ordenadores se integren de forma inextricable y transparente en nuestra vida diaria fue bautizada "computación ubicua", hace ya más de diez años, por el informático Mark Weiser [*véase* "El ordenador del siglo XXI", por Mark Weise; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, noviembre de 1991]. Estoy convencido de que la información superpuesta de los sistemas de RC se convertirá, de igual manera, en una de esas cosas que damos por sentado que nos encontraremos en el trabajo y en los juegos: rótulos e indicaciones para no perdernos, recordatorios de lo que no queremos olvidar o algún personaje de dibujos animados. Cuando las interfaces informáticas de usuario se encuentren por doquiera, esta ubicua mezcla de realidad y virtualidad quizá se convierta en el medio fundamental de una nueva generación de artistas, diseñadores y narradores.

Bibliografía complementaria

A SURVEY OF AUGMENTED REALITY. Ronald T. Azuma en *Presence: Teleoperators and Virtual Environments*, vol. 6, n.º 4, páginas 355-385; agosto 1997.

RECENT ADVANCES IN AUGMENTED REALITY. Ronald T. Azuma, Yohan Baillot, Reinhold Behringer, S. K. Feiner, Simon Julier y Blair MacIntyre en *IEEE Computer Graphics and Applications*, vol. 21, n.º 6, páginas 34-47; noviembre/diciembre 2001.



Ondas en el espacio-tiempo

Se han invertido ocho años y 400 millones de euros en construir una clase revolucionaria de observatorio que debería detectar ondas gravitatorias. Pero, ¿funcionará? Hace poco se le puso a prueba

W. Wayt Gibbs

Frederick J. Raab observa con unos prismáticos un tubo de hormigón recto como una vara; el edificio donde acaba, cuatro kilómetros al norte, es uno de los extremos del observatorio LIGO de Hanford (estado de Washington). Gira sobre sus talones 90 grados en dirección oeste y barre con la vista unos parajes desérticos cubiertos de artemisas hasta que divisa un tubo idéntico al anterior, con otro edificio en su extremo, a cuatro kilómetros de distancia también. "Cuando hablamos de tener controlado el haz del láser" que brilla dentro de esos dos tubos, explica, "nos referimos a mantener estables las ondas de luz con una precisión mayor que el ancho de un átomo, y a lo largo de toda esta distancia".

Raab dirigió la edificación de este gigantesco cartabón. Con otro semejante en Livingston, en los bosques de Luisiana, forma el par de detectores más sensibles —si se cumplen las expectativas de sus diseñadores—, costosos y grandes que se han construido en los 40 años que se está a la caza de las ondas gravitatorias. En parte metros, en parte relojes, estos dos instrumentos medirán el espacio-tiempo a fin de captar cómo sacuden el continuo los cataclismos más violentos del universo: estrellas que explotan, agujeros negros que chocan, quizá fenómenos todavía fuera de nuestra imaginación. A medida que las ondas que generan esos fenómenos se expanden a la velocidad de la luz, van estirando y comprimiendo, estirando y comprimiendo el espacio, y, por tanto, ensanchando y contrayendo la separación entre los objetos. Para cuando alcanzan la Tierra, son tan débiles, que alteran las distancias en menos de una parte en mil trillones.

1. EL LLANTO DEL NACIMIENTO y los estertores de la muerte de los titanes celestes —en esta simulación por superordenador, dos agujeros negros (*esferas*) que colisionan— vibran a lo ancho del universo en forma de ondas de energía gravitatoria. Este año, unos instrumentos nuevos, de tamaño y sensibilidad impresionantes, intentarán sintonizar por primera vez dichas señales.

A pesar de la técnica puntera con que se ha fabricado el LIGO, no está claro que puedan alcanzarse sensibilidades tan increíbles. Achicados hasta quedarse en débiles murmullos, los más poderosos sucesos cósmicos se ahogan en la más modesta de las perturbaciones. "Las mareas deforman la corteza de la Tierra y los océanos", comenta Raab; desplazan los edificios de aquí en un tercio de milímetro, cien mil millones de veces más que una onda de gravedad. Un terremoto de una magnitud superior a 6 en cualquier lugar de la Tierra, un camión circulando por una carretera cercana o el usar los ordenadores del laboratorio contiguo sacuden el suelo en más que el ancho de un átomo. "Incluso el ruido de los reactores que pasan sobre nuestras cabezas ejerce un efecto."

En la sala de control observamos los esfuerzos del instrumento por compensar los golpes y las sacudidas. La prueba había comenzado el 28 de diciembre de 2001. A los 14 días del ensayo, va ganando el ruido. Raab mira con detenimiento las gráficas proyectadas sobre la pared del fondo. Una línea roja sube y baja. Es el estado del detector principal; se sale de control, se normaliza y vuelve a descontrolarse unos minutos después. Una línea azul representa el estado de un detector más pequeño; este control de calidad persiste plano.

H. Richard Gustafson va arreglando fallos con sus compañeros del LIGO de Livingston; se comunican por medio de una videoconferencia. A la conversación se une el director de GEO 600, un instrumento, más pequeño pero similar, instalado cerca de Hannover, en Alemania. "Aquí en Hanford tuvimos una noche horrible", dice Gustafson mientras cuenta los problemas que han padecido con las computadoras y la electrónica.

El instrumento de Luisiana se ha venido comportando de manera más previsible. Durante la noche funcionó con normalidad, pero a las 6:30 de la madrugada la línea de la pantalla de control se aplanó; había ya tráfico mañanero en la interestatal 12, a pocos kilómetros del observatorio, y empezaban los leñadores de la maderera Weyerhaeuser a talar pinos no muy lejos de allí. GEO, cuyos brazos sólo miden 600 metros, con una precisión menos exigente, es un dechado de fiabilidad: funciona el 90 % del tiempo. Pero se necesitan los tres instrumentos en forma y trabajando a la vez. En dos semanas el mejor lapso de operación simultánea fue de apenas hora y media.

Szabolcs Márka, investigador del LIGO de Livingston, se muestra contento con el progreso de esta prueba, la quinta realizada y última antes de que los dos instrumentos comiencen, según está anunciado, sus observaciones rutinarias el 29 de junio.

Penalidades y estertores

Desde que los fundadores del proyecto LIGO —Kip S. Thorne y Ronald Drever, del Instituto de Tecnología de California (Caltech), y Rainer Weiss, del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT)— propusieron en 1984 la construcción de un "observatorio de ondas gravitatorias por medio de la interferometría láser" (cuyo acrónimo en inglés es LIGO), nadie dudaba de que requeriría un trabajo de ingeniería hercúleo. Esta es una de las razones por las que "el proyecto encontró una tremenda oposición por parte de los astrónomos", según Harry M. Collins, sociólogo de la Universidad de Cardiff que ha estudiado el avance de esta disciplina.

"La FNC desestimó nuestras dos primeras propuestas", recuerda Thorne. "Y la tercera, enviada en 1989, fue revisada a fondo durante cinco años." Algunos astrónomos de gran prestigio, como Jeremiah P. Ostriker, de la Universidad de Princeton, pusieron objeciones al alto coste, que para 1993 era de 275 millones de euros. Temían que no quedara dinero para otros proyectos de menor magnitud y riesgo. El comité selecto que debía ordenar las prioridades de los astrónomos para el decenio de 1990 excluyó el LIGO de su lista. "Fue una decisión unánime", dice John Bahcall, del Instituto para Estudios Avanzados de Princeton, que presidió ese comité. El Congreso aprobó la propuesta del LIGO, pero no concedió fondos hasta 1994.

Thorne y otros proponentes de LIGO argumentaban que las señales gravitatorias abrirían un campo completamente nuevo de la astronomía porque llevan consigo una información acerca del universo que no se puede recoger de otra forma. Albert Einstein predijo estas ondas etéreas en 1918; las consideraba una consecuencia inevitable de su teoría de la relatividad general. Según la célebre premisa einsteiniana, la fuerza atractiva que llamamos gravedad existe porque la masa de los cuerpos deforma el universo tetradimensional. Si un objeto denso se mueve violentamente, el espacio tiembla.

Cuando, por poner un ejemplo, una estrella gigante consume su combustible, el estallido despide la luz de diez mil millones de soles: una supernova. Se piensa que las capas exteriores de la estrella son expulsadas al espacio mientras el núcleo de hierro implosiona con fuerza suficiente como para que todos sus electrones y protones se combinen en neutrones y partículas exóticas. En apenas unos minutos, una esfera sólida de metal del tamaño de la Tierra se contrae hasta convertirse en una estrella de neutrones de menos de 20 km de diámetro; su densidad es tan grande que una cucharadita de material de su superficie pesaría casi mil millones de toneladas. Se supone que la energía gravitatoria que emitiría una supernova no del todo simétrica alcanzaría la Tierra varios minutos antes que el fogonazo de luz, tiempo suficiente para que los telescopios ordinarios apuntasen hacia la explosión. De mayor importancia serían, no obstante, los detalles que la señal gravitatoria aportaría acerca del nacimiento de la estrella de neutrones, pese a la pequeñez del objeto y el velo de gas ardiente que lo rodearía.

Resumen/Los detectores de ondas gravitatorias

- Aunque los astrónomos nunca han detectado ondas de gravedad directamente, la teoría de la relatividad de Einstein predice que los cataclismos violentos de la magnitud del choque de dos agujeros negros producen la vibración del espacio.
- Para cuando las ondas alcancen la Tierra, se habrán debilitado tanto, que distinguirlas del ruido que las rodea será como dar con un grano de arena perdido en una playa oceánica.
- Se han construido seis interferómetros de alta precisión a lo largo y ancho de todo el mundo con el objeto de detectar estas señales. Tres están en Estados Unidos, preparados para tomar datos científicos desde el 29 de junio de 2002. Pero aún se está trabajando para alcanzar la sensibilidad necesaria.



2. **LA SALA DE CONTROL del observatorio LIGO de Livingston fue el hogar del físico Szabolcs Márka, del Caltech, durante los 18 días que duró la prueba del instrumento; él la dirigió. A pesar de todas las dificultades, el equipo logró tomar durante más de 70 horas datos científicos simultáneos de los tres interferómetros estadounidenses.**

El LIGO se diseñó para detectar no sólo el nacimiento de las estrellas de neutrones, sino también su muerte. La mayoría de las estrellas giran alrededor de una compañera; en ocasiones ambas explotan convertidas en supernovas sin que se rompa su vínculo. A cada revolución, las dos estrellas de neutrones pierden un poco de energía arrugando el espacio que las envuelve. Las órbitas, por tanto, menguan poco a poco hasta que los dos astros se disgregan y funden en uno; a veces se crea entonces un agujero negro. Hacia el final del frenético tango, cada uno de esos dos pesados cuerpos da una vuelta alrededor del otro cientos de veces por segundo; el lienzo del espacio-tiempo se agita con fuerza. Los impulsos de radio recibidos de este tipo de sistemas binarios son la prueba más convincente, si bien indirecta, de que las ondas gravitatorias existen de verdad.

Pero aún está por ver si los grupos del Caltech y del MIT que manejan el LIGO en nombre de la FNC lograrán la detección directa de esas ondas. "Lo más curioso del LIGO", dice Collins, "es que, al menos en su primera versión, no puede prometer éxitos".

Fenómenos espectrales

El problema no radica en la debilidad de las ondas gravitatorias. "Es increíble la energía que contienen", afirma Gabriela I. González, física del LIGO de Livingston. Durante el último minuto en que las estrellas de neutrones, a 65 millones de años-luz de la Tierra, caen en espiral hacia su muerte, la pulsación gravitatoria que se emite es tan intensa, que "si llegara en la forma de luz visible, sobrepasaría el brillo de la luna llena".

A diferencia de la luz, que deposita toda su energía cuando choca contra la materia, la gravedad atraviesa los objetos sólidos como un fantasma; la interacción es pequeñísima. Para una onda gravitatoria, la Tierra y todo lo que hay sobre ella es perfectamente transparente. Incluso la poderosa señal de la fusión de dos estrellas de neutrones apenas afectaría al punto central de cada espejo más que en unos attómetros (10^{-18} metros). Para semejante sensibilidad está pensado el LIGO.

Mientras un brazo del observatorio se dilata, el otro se contrae; la fase y la frecuencia de la luz del

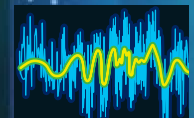
EL OBSERVATORIO MUNDIAL DE LA GRAVEDAD

A finales de 2003, seis nuevos detectores de ondas gravitatorias deberían estar funcionando: dos en Hanford (estado de Washington) y uno en Livingston (Luisiana), en Hannover, en Pisa y en Tokio. Aunque son muy diferentes en tamaño, sensibilidad y detalles, funcionan de manera bastante parecida (*abajo a la derecha; véase también el recuadro* "El viaje de un fotón a través del LIGO" *para más detalles*). Puesto que estos aparatos ultrasensibles recogen muchos ruidos terrestres, se utilizan ordenadores para rastrear los datos en bruto (*abajo*) y distinguir los patrones que producirán, según se predice, las ondas de gravedad.

CONCRETAR LA FUENTE

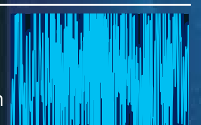
A medida que un impulso gravitatorio barre la Tierra, la misma onda golpeará cada uno de los detectores en un instante un poco diferente, permitiendo así a los astrónomos distinguir la fuente y eliminar cualquier otra causa de vibración.

LIGO
PATROCINADOR: EE.UU.
LONGITUD DEL BRAZO: 4 km en Livingston y 4 km y 2 km en Hanford
PICO DE LA SENSIBILIDAD: tres partes en 10^{23} a 180 hertz.
ESTADO: las observaciones comienzan en junio de 2002
COSTO: 580 millones de euros hasta 2007



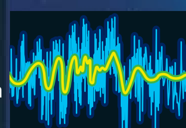
COINCIDENCIA CON UN MODELO, POSIBLE FUSION

TAMA 300
(NO MOSTRADO)
PATROCINADOR: Japón
LONGITUD DEL BRAZO: 300 m
PICO DE LA SENSIBILIDAD: cinco partes en 10^{21} desde 700 a 1000 hertz
ESTADO: las observaciones preliminares comenzaron en 2001
COSTO: 11 millones de euros



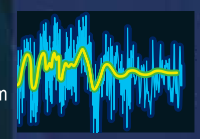
FUERA DE FUNCIONAMIENTO DEBIDO A UN TERREMOTO EN INDONESIA

GEO 600
PATROCINADOR: Reino Unido y Alemania
LONGITUD DEL BRAZO: 600 m
PICO DE LA SENSIBILIDAD: ocho partes en 10^{23} a 600 hertz
ESTADO: las observaciones comenzarán en 2002
COSTO: 11 millones de euros



COINCIDENCIA CON UN MODELO, POSIBLE FUSION

VIRGO
PATROCINADOR: Italia y Francia
LONGITUD DEL BRAZO: 3 km
PICO DE LA SENSIBILIDAD: una parte en 10^{22} a 500 hertz
ESTADO: las observaciones comenzarán en 2003
COSTO: 72 millones de euros

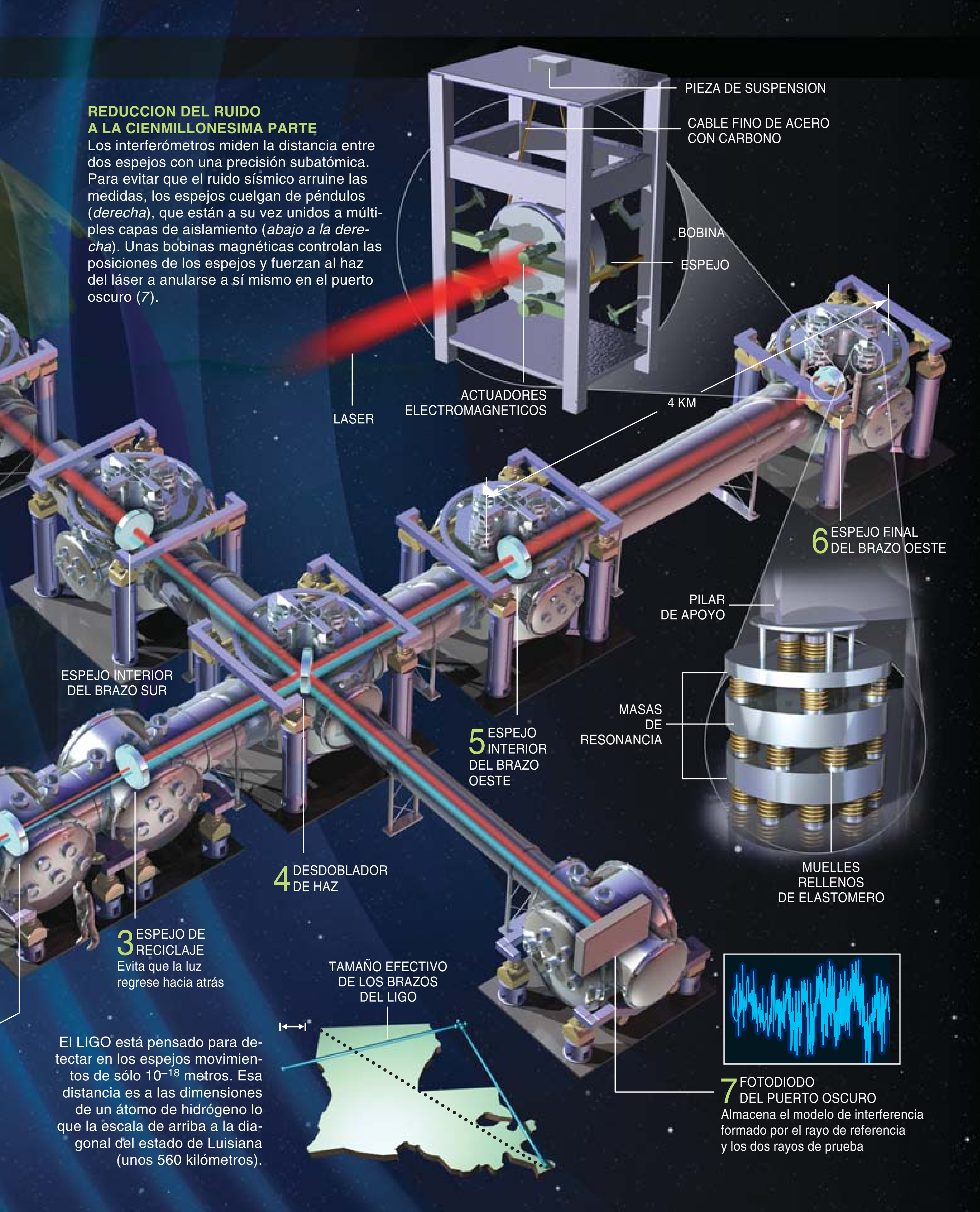


COINCIDENCIA CON UN MODELO, POSIBLE FUSION

** El pico de la sensibilidad se refiere a los objetivos del diseño que todavía no se han logrado*

UNA VIBRACION DE UNA PARTE EN MIL TRILLONES

Una onda gravitatoria expandirá el espacio entre los espejos del brazo oeste deL LIGO de Livingston (*5* y *6*) mientras acerca los del brazo sur. Cuanto más largos sean los brazos, mayor será el cambio. Al hacer que la luz del láser recorra unas 100 veces los brazos antes de regresar al desdoblador de haces (*4*), el LIGO actúa casi como si sus brazos tuvieran unos 400 kilómetros de largo.



REDUCCION DEL RUIDO A LA CIENMILLONESIMA PARTE

Los interferómetros miden la distancia entre dos espejos con una precisión subatómica. Para evitar que el ruido sísmico arruine las medidas, los espejos cuelgan de péndulos (*derecha*), que están a su vez unidos a múltiples capas de aislamiento (*abajo a la derecha*). Unas bobinas magnéticas controlan las posiciones de los espejos y fuerzan al haz del láser a anularse a sí mismo en el puerto oscuro (*7*).

El LIGO está pensado para detectar en los espejos movimientos de sólo 10^{-18} metros. Esa distancia es a las dimensiones de un átomo de hidrógeno lo que la escala de arriba a la diagonal del estado de Luisiana (unos 560 kilómetros).

láser dentro de los brazos cambian en sentidos opuestos. Cuando los haces procedentes de los dos brazos se superponen al haz de referencia, las fluctuantes pulsaciones que generan son decodificadas por las computadoras para desvelar los cambios en la curvatura del espacio-tiempo dentro de los brazos. En principio, la técnica, conocida como interferometría, es capaz de medir cambios en la distancia mucho menores que la longitud de onda de la luz infrarroja del láser; mucho más pequeñas, incluso, que el núcleo de un átomo (*véase el recuadro* "El viaje de un fotón a través del LIGO").

No impresiona mucho a los astrónomos que el LIGO prometa semejante sensibilidad. Las parejas de estrellas de neutrones son raras; su muerte es muy espectacular, pero rápida. Dentro de una distancia de 65 millones de años-luz, se calcula que sólo ocurre una fusión cada 10.000 años. "Por lo tanto, aunque cabe dentro de lo posible que veamos esas ondas", asegura Thorne, "no es muy probable". Le parece más factible que el LIGO recoja la señal de la fusión de dos agujeros negros en uno, que centuplica la de dos estrellas de neutrones. Pero los teóricos tienen una incertidumbre de un factor 1000 acerca de la frecuencia de estos sucesos dentro del alcance del LIGO. Lo mismo podría haber 10 en un año que uno en un siglo.

Llegar hasta 300 millones de años-luz mejoraría notablemente la estadística, pero entonces un suceso típico cambiaría la longitud relativa de los brazos de LIGO en sólo una parte entre 10^{22}. Habrá que esperar la segunda versión del LIGO para poder detectar desplazamientos tan

El viaje de un fotón a través del LIGO

Para comprender el funcionamiento del interferómetro LIGO, imaginemos la aventura de un fotón que lo atraviese. (Obviaremos algunos detalles para mayor claridad.) El fotón se crea en un láser del tamaño de una maleta y con la potencia de 20.000 punteros láser. Es uno entre un billón que llevan el mismo paso en el haz infrarrojo.

1 Parte del haz se desvía a un aparato que convierte la luz en dos haces de referencia, la frecuencia de uno ligeramente mayor que la del haz principal, la del otro menor. Este modulador de frecuencias crea así un modelo con el que se comparará el haz de prueba al final del viaje. Tras el desvío, los haces se recombinan y atraviesan una ventana de cuarzo para entrar en una cámara de vacío. Durante la construcción se tuvo especial cuidado en evitar que nuestro fotón se alejara de su camino. Unas bombas de vacío mantienen la presión del aire por debajo de una billonésima de atmósfera. Los espejos, del tamaño de un plato, con un grosor de 10 centímetros, se pulieron con una precisión superior a los 16 átomos. Y el grosor de las películas reflectoras que cubren la óptica no varía en más de dos átomos.

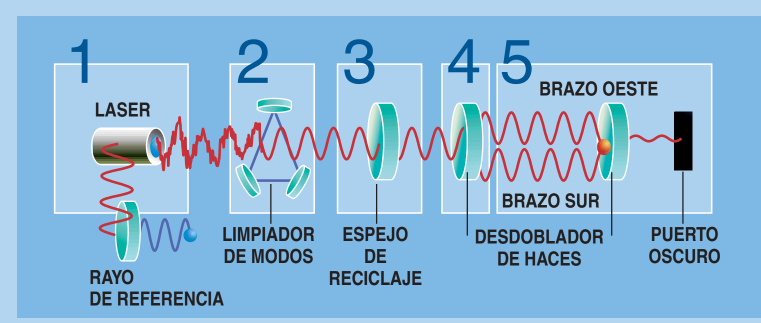
2 El fotón entra en un bucle construido con tres espejos que forman un triángulo estrecho. Este "limpiador de modos" es un punto de control de calidad: el fotón puede continuar su camino sólo si forma parte del haz que tiene la estructura y dirección correctas. La luz que no se ajuste a lo requerido sale por un tragaluz.

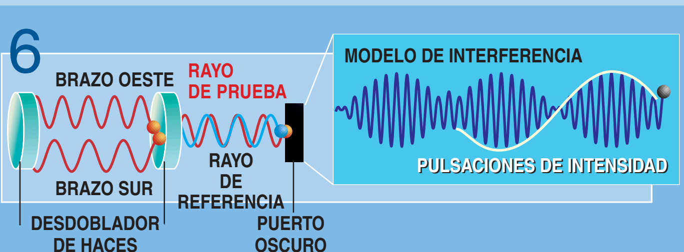
3 El fotón apenas nota el espejo de dirección única que atraviesa en la siguiente cámara. Este espejo bloquea los fotones que intenten regresar al láser; al atrapar a todos los fotones dentro del dispositivo, multiplica por 16 la potencia del haz de luz.

4 En el desdoblador de haces, el fotón se divide en dos idénticos. Una corriente de fotones continúa hacia delante por el brazo oeste. La otra corriente se invierte, mutados los valles en crestas, al reflejarse hacia el brazo sur. Los dos haces de prueba atraviesan los espejos interiores y se internan en los 4 kilómetros de tubo de acero. Pero la entrada les es denegada a los haces de referencia de frecuencia un poco modificada, que desandan lo andado en dirección al desdoblador de haces; circulan a través de la óptica central hasta que regresen los fotones de los haces de prueba.

5 Mientras tanto, nuestro fotón y su gemelo inverso recorren los largos brazos y rebotan en un espejo en ambos extremos. Aunque los átomos de los espejos vibran con el calor, su movimiento es aleatorio y el haz golpea billones de átomos a la vez. En promedio, las vibraciones térmicas se anulan. Los fotones gemelos rebotan entre los espejos interiores y finales de sus respectivos brazos. Realizan alrededor de unos cien viajes de ida y vuelta antes de colarse a través del espejo interior y reencontrarse con el desdoblador de haces, que los envía en dirección norte hacia un puerto oscuro. De ordinario, nuestro fotón y su otro yo tendrán oscilaciones opuestas. Las crestas se encontrarán con los valles y los dos fotones se anularán mutuamente. El puerto oscuro permanecerá oscuro.

6 Pero si durante el viaje de los fotones una onda de gravedad entra en el instrumento, el espacio se curvará; un brazo se alargará y el otro se acortará. Las crestas se encontrarán con las crestas y se iluminará el puerto oscuro. Es más, los fotones de prueba reunidos se combinarán también con los haces de referencia a los que se les ha modulado la frecuencia. Como si se tratara de notas musicales un poco desafinadas, la luz pulsará; se hará más brillante y más débil al paso de la onda gravitatoria. Finalmente, el fotón golpea un fotodiodo y se convierte en una señal electrónica perceptible, el rastro de un temblor del espacio-tiempo.





minúsculos; vendría a ser como descubrir que Saturno se había acercado al Sol la envergadura de un átomo de hidrógeno.

La tierra inquieta

Por si ya no fueran las cosas tan difíciles, los ingenieros del LIGO tienen que vérselas con la vibración de los espejos por multitud de razones sin relación alguna con las explosiones de supernovas, las estrellas de neutrones o los agujeros negros. En virtud del calor, las moléculas de los espejos y de los cables que los sostienen se mueven aleatoriamente. Este ruido térmico puede enmascarar las ondas gravitatorias que tengan una frecuencia entre 50 y 200 hertz. A frecuencias superiores, el interferómetro está sometido a un efecto cuántico llamado ruido de golpeo, que ocurre porque el número de fotones que golpean los sensores cambia de un instante al siguiente. "Se podría dar más intensidad al láser para aumentar la señal sobre el ruido", indica Norna Robertson, una de las diseñadoras del instrumento GEO. "Pero si ponemos mucha luz dentro, golpeará los espejos de forma aleatoria."

Por el momento, el mayor problema del LIGO son las bajas frecuencias; en ellas, el suelo está en constante movimiento. "A 100 hertz, sube y baja unos 10^{-11} metros", dice Raab. "Queremos ver movimientos de hasta 10^{-19} metros", porque esa distancia es la 10^{22}-ava parte de los 4 kilómetros de longitud de los brazos del LIGO. "Para eso tenemos que dejar el ruido sísmico en su cienmillonésima parte."

Nos pusimos unas gafas protectoras y unos cubrezapatos para visitar el recinto donde se encuentran el láser y la mayoría de los sensores del detector. Cuando se abre la puerta de la sala, Raab baja el tono de la voz.

Raab se dirige a una cámara de vacío de acero, con las dimensiones de una furgoneta. Para llegar desde el exterior al espejo interior, un movimiento sísmico debe atravesar una serie de elementos concebidos para debilitar su energía: una plancha de 1 metro de hormigón reforzado, gatos de tijera, cojinetes de aire, cuatro capas de gruesos muelles especialmente construidos para la tarea, cuatro pesadas planchas de acero (cada una con una frecuencia de resonancia distinta) y, finalmente, un péndulo de cable fino de acero. "Reducimos el ruido sísmico en un factor de cien con la suspensión pendular y en un factor de un millón con las pilas de aislamiento", explica Raab. Algunos movimientos de la superficie, como las mareas lunares, tienen que amortiguarse con artilugios activos, entre ellos unos electroimanes controlados por ordenador que empujan y tiran de unos pequeños imanes pegados a los espejos.



3. MARK COLES, director del LIGO de Luisiana, intenta solventar las dificultades que la tala de árboles, el tráfico y otras fuentes de ruido le plantean a la ingeniería. "Puede que durante los primeros años no seamos capaces de alcanzar toda la sensibilidad que se tenía pensada", afirma. "Pero sigue siendo un gran proyecto en el que trabajar."

Aun así, algunas veces no basta con reducir el ruido externo hasta la cienmillonésima parte. "Hace poco ha habido un terremoto de magnitud siete en Sumatra; nos dejó fuera de servicio", comenta Raab. También unos vientos fuertes descontrolaron el interferómetro de Hanford.

No todos los movimientos sísmicos son naturales. Robert Schofield, de la Universidad de Oregón, se

encarga de rastrear el origen de los ruidos del LIGO. Le da vueltas a la gráfica de las últimas señales recibidas en el detector. "Mira este pico", me dice. "Justo a 2,3 hertz. No lo había visto antes porque es muy estrecho, pero es el 20 por ciento del ruido que está afectando al interferómetro". Analizando las lecturas de la batería de sismómetros que rodean el observatorio, concluye que procede de cerca de la sección 200 Este de la Reserva Nuclear de Hanford, un basurero radiactivo de 1400 kilómetros cuadrados de extensión que rodea al LIGO de Hanford.

Schofield toma un sismómetro y un osciloscopio y los introduce en una furgoneta. Se interna unos kilómetros en la reserva y monta el equipo. Vemos las luces brillantes de alguna operación nocturna en la sección 200 Este. Pero no podemos acercarnos más porque el área guarda tanques de basura con plutonio y está protegida por fuerzas de seguridad. Schofield activa el sismómetro durante casi cinco minutos. Ni rastro del pico a 2,3 hertz.

Afortunadamente, el ruido de unos dos hertz no es un problema por ahora. El LIGO, al igual que otros observatorios gigantes para la detección de ondas gravitatorias casi terminados ya —GEO en Alemania, TAMA en Tokio y VIRGO cerca de Pisa—, escuchará ondas gravitatorias entre 40 y 3000 hertz, precisamente las frecuencias que capta el oído humano. En la sala de control, los operadores del LIGO tienen conectado un altavoz a los sensores del interferómetro; emite lo que el instrumento "oye". Una supernova cercana sonaría como un brote de estática. El lamento de las estrellas de neutrones agonizantes empezaría grave e iría subiendo en un gorjeo casi musical.

En el ruido no suele haber más que silbidos y estallidos, pero en ocasiones se cuela algún sonido reconocible. "Hay un periscopio en la mesa del láser que levanta el haz a la altura correcta", cuenta Schofield. Ciertos ruidos pueden mover el periscopio y producir pequeños desplazamientos Doppler en la frecuencia de la luz que lo atraviesa.

El ruido de fuera

Las instalaciones no sólo están plagadas de sismógrafos. Abundan los micrófonos, magnetómetros y sensores que vigilan la temperatura, la presión y el viento. Se graban a la vez los flujos de datos procedentes de unos 5000 sensores. Lo primero que los científicos harán si piensan que han visto una onda gravitatoria será buscar señales falsas y ruidos que hayan podido introducirse en el sistema.

En el último día de la prueba, González le entrega al director, Mark Coles, una gráfica con los resultados que el interferómetro ha obtenido esa mañana. Se ve una joroba que parece una señal real. Pero no lo es. "Acabamos de inventar un velocímetro para la barrera del ga-

Próxima generación de detectores

Aunque el LIGO alcanzara la sensibilidad para la que fue concebido, sus posibilidades de detectar ondas gravitatorias serían escasas. "Pero nuestra estrategia desde un principio ha sido proceder en dos pasos", dice el físico del Caltech Kip S. Thorne: primero se consigue que las máquinas funcionen y se va ganando confianza en ellas, luego se mejora la instalación con componentes avanzados que garantizarán la detección regular de señales.

Aunque los responsables del proyecto aún no han hecho una propuesta formal, saben más o menos lo que quieren. "Las reformas costarán del orden de 100 millones de euros, se empezarán alrededor de 2006 y acabarlas llevará dos años", afirma el director del LIGO, Barry Barish. El láser pasará de los 10 a los 180 watt. La óptica, en vez de colgar de lazadas simples de cable de acero, estará sujeta por cintas de sílice a un péndulo de tres fases que ahora se está ensayando en el detector GEO 6000 de Alemania. Y se sustituirán los espejos de vidrio de sílice de 11 kilos de peso por cristales de zafiro que pesarán 30.

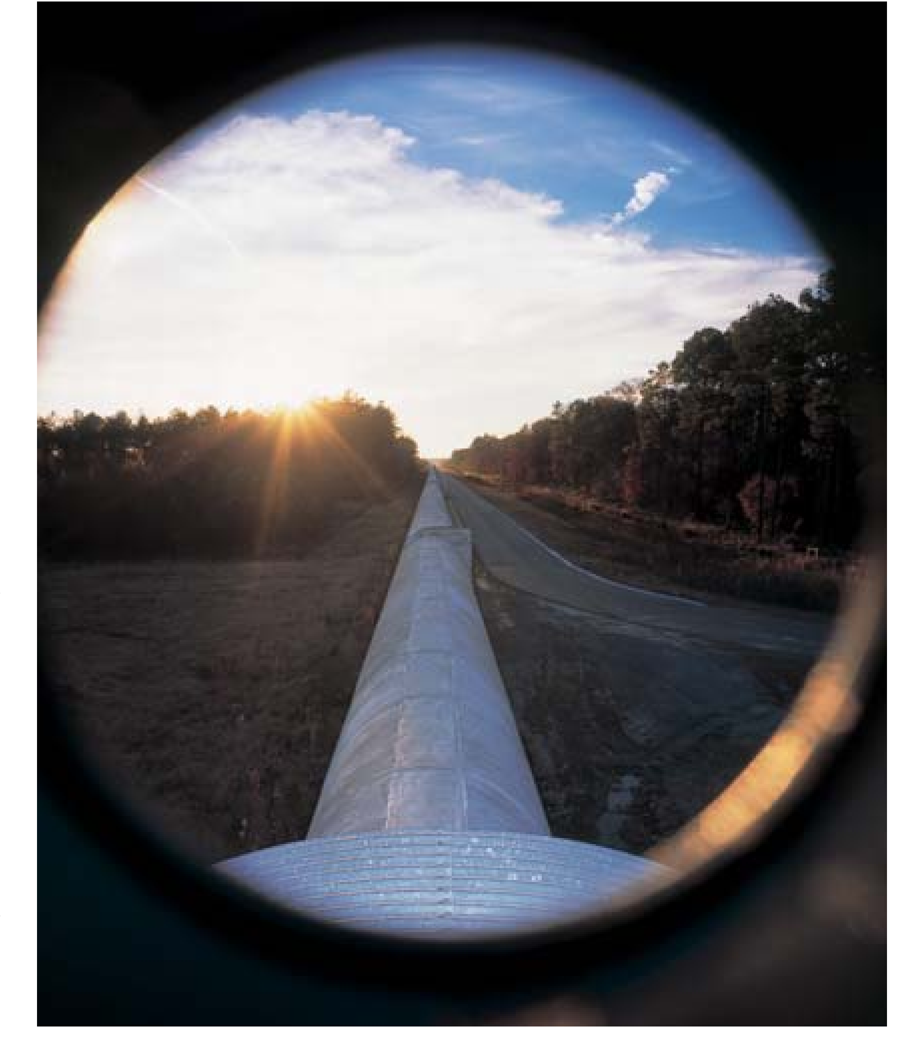
Los cambios multiplicarán la sensibilidad por 20, según estima Barish. Esto pondrá al instrumento, afirma Thorne, "en un campo donde, por primera vez, los seres humanos observarán objetos de su mismo tamaño comportándose según las leyes de la mecánica cuántica". Se han desarrollado técnicas cuánticas "no demoledoras"; con ellas se logran mediciones el doble de precisas de lo que permitiría el principio de indeterminación de Heisenberg. Si todo funciona, "se incrementará unas 8000 veces el volumen del espacio que podremos explorar", comenta Barish.

Los japoneses también han pensado en un sucesor para su interferómetro de 300 metros TAMA, pero el director del proyecto, Yoshihide Kozai, teme que pasarán unos años antes de que consigan fondos para su construcción. El Gran Telescopio Criogénico de Ondas Gravitatorias tendrá brazos de tres kilómetros y se construirá en las profundidades de la mina de Kamioka. Unos espejos de zafiro muy enfriados, de 51 kilogramos de peso cada uno, servirán para alcanzar la sensibilidad del LIGO II a frecuencias inferiores a los 40 hertz.

La NASA y la Agencia Espacial Europea (ESA) están diseñando un observatorio de ondas de gravedad más ambicioso, el LISA. En 2011 se lanzará un trío de satélites equipados con láseres que formará un interferómetro con brazos de cinco millones de kilómetros —diez veces la distancia Tierra-Luna—. El trío mantendrá las posiciones relativas con una precisión de una micra en su órbita alrededor del Sol. Aunque el LISA no será mucho más sensible que el LIGO II, podrá detectar ondas de gravedad a frecuencias mucho más bajas que cualquier detector construido sobre la superficie.

"Lo más probable es que el LISA vea el movimiento de pares de agujeros negros de gran masa —de un millón a miles de millones de veces más pesados que el Sol— en órbita uno alrededor del otro en el centro de galaxias muy lejanas", dice Thorne. "Los astrónomos no caben en sí de gozo con el LISA", cuenta Rainer Weiss, del MIT "Están seguros de que verán algo." Pero puesto que su precio no andará lejos probablemente de los 600 millones de euros, predice que "costará mucho más que el Congreso apruebe el LISA que el LIGO".

4. MAS RECTO que la superficie de la Tierra, el túnel de hormigón que alberga al brazo oeste del LIGO de Livingston se levanta del suelo unos cuantos metros a lo largo de sus cuatro kilómetros de recorrido; mientras, el planeta se curva por debajo. Dentro del túnel se ha tendido una tubería de acero hermética; en ella se ha operado el vacío, a través del cual brilla un rayo de luz infrarroja con la potencia de 20 millones de punteros láser.



nado de la carretera de entrada", dice con una sonrisa. Cuando pasa cada eje de un camión sobre las barras horizontales aparece una vibración en el canal de las ondas gravitatorias.

Las señales espurias se eliminan comparando los datos de dos o más observatorios, según explica Márka. "Si los dos sitios del LIGO observan la misma señal en un intervalo de milisegundos, y también lo hace GEO, que está en otra plataforma continental y conectado a una red eléctrica distinta, resulta entonces improbable, muy improbable que la señal sea falsa y proceda de alguna fuente común de ruido."

No obstante, aún se puede hacer mucho más por superar el ruido que generan los seres humanos. Este problema adquiere especial importancia en Livingston. "Podemos ver los trenes que pasan tres veces al día", detalla Coles, "a los leñadores que talan árboles, el tráfico a la hora de la comida". Durante la prueba, el instrumento de Livingston estuvo operativo sólo el 62 % del tiempo, sin contar pequeñas irregularidades. Los tres interferómetros LIGO sólo trabajaron a la vez el 18 % del tiempo.

"Sabemos que tenemos un problema con el ruido en Livingston", reconoce Rainer Weiss, portavoz del LIGO. "Y empeorará. La sociedad se nos va acercando." Barry Barish, que dirige el proyecto, asegura que se están preparando nuevos medios activos de aislamiento; se instalarán el año que viene. "Hubiera deseado no tener que hacerlo", confiesa Weiss. "Era una de las mejoras de ingeniería que habíamos planteado para el LIGO II, en 2006." Supondrá un coste adicional de al menos 825.000 euros sobre los 400 millones que la FNC ha gastado hasta la fecha y sobre los 180 millones que acaban de adjudicarse para los próximos cinco años.

Pero incluso cuando el sistema funciona, dice Weiss, "estamos muy lejos —un factor 1000— del límite de sensibilidad que nos habíamos propuesto. Esperamos mejorar en un factor 10 para junio. Pero no sé si podremos ir más allá".

Esta incertidumbre preocupa a Ostriker, sempiterno crítico del LIGO: "Siempre he creído que detectar ondas gravitatorias nos facilitaría nuevos conocimientos que de otra forma no podríamos adquirir. Dicho esto, también creo que el proyecto LIGO constituye un enorme derroche; ese dinero podría haberse dedicado a proyectos científicos más productivos".

Thorne no comparte esa opinión. "Los teóricos no se han lucido prediciendo qué se iba a ver cada vez que se ha abierto una ventana nueva al universo", afirma. "Los primeros radiotelescopios detectaron unas señales mucho más intensas de lo que se había calculado. Y lo mismo pasó cuando se abrió la ventana de los rayos X en los años sesenta. Y cuando empezamos a observar los neutrinos que llegan del Sol, nos quedamos sorprendidos de que fuesen tan pocos. Abrir la ventana de las ondas gravitatorias nos dará una visión del universo distinta, y distinta de una manera más radical de cuanto lo fueron las visiones que les debemos a esos otros avances."

Bibliografía complementaria

EINSTEIN'S UNFINISHED SYMPHONY. Marcia Bartusiak. Joseph Henry Press, 2000.

LASER INTERFEROMETRIC GRAVITATIONAL WAVE DETECTORS. Norna A. Robertson en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 17, n.º 15, págs. R19-R40; 7 de agosto de 2000.

NEW PHYSICS AND ASTRONOMY WITH THE NEW GRAVITATIONAL-WAVE OBSERVATORIES. Soctt A. Hughes et al. en *Proceedings of the 2001 Snowmass Meeting*.

PERFILES

David Appell

MILDRED S. DRESSELHAUS: Aspiraciones científicas y sociales

En este anodino vestíbulo del edificio 13 del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT) se ha formado un corro en torno a Mildred S. Dresselhaus. Con tranquilidad no exenta de firmeza va ésta repartiendo juego. Enlaza la respuesta a un colaborador con la pregunta a otro sobre la posibilidad de acudir al aeropuerto a recibir a un visitante. Se me dirige luego con deferencia:

"Al parecer me está usted esperando". Encontramos una sala de conferencias vacía, "lejos del teléfono", y a partir de ese momento me presta toda su atención. "Típico de Millie", según me cuentan más tarde sus amigos y colegas. "Tiene una desenvoltura fantástica y una energía inagotable", dice el físico Daniel Kleppner, compañero suyo en el Instituto. "Se las arregla para hacer dos o tres cosas a la vez y todas bien. Nunca está con los brazos cruzados."

La dilatada trayectoria profesional de Dresselhaus impone respeto: en la cresta de la investigación sobre el carbono durante 40 años; autora o coautora de casi 1000 artículos; tutora de más de 60 estudiantes de doctorado; con cargos nacionales en diferentes asociaciones científicas profesionales; ex directora de la Secretaría Científica del Departamento de Energía, uno de los organismos que más dinero dedican en Estados Unidos a la investigación básica. Además, le han otorgado 17 doctorados *honoris causa* y en 1990 recibió la Medalla Nacional de la Ciencia.

Y todo esto, comenzado en una época en que las condiciones profesionales eran mucho más difíciles para las mujeres. "No pensábamos que tuviéramos un porvenir en la física", dice de sus compañeras. "Lo hacíamos porque nos interesaba; nuestra esperanza era llegar a investigar algo." Pero tuvo suerte y se encontró bajo la tutela de varios premios Nobel, algunos que ya lo tenían y otros que lo conseguirían más tarde. Se licenció en física en 1951 por el Colegio Universitario Hunter; uno de sus mentores fue Rosalyn S. Yalow, física médica. Tras un año en la Universidad de Cambridge con una beca Fulbright, sacó el grado en la Universidad de Harvard, donde tuvo como tutor al físico Norman F. Ramsey. Acabó el doctorado en física del estado sólido en la Universidad de Chicago; allí asistió a las clases de Enrico Fermi. "Aprendí de él mucho sobre los métodos de enseñanza, la importancia de explicarse con sencillez. Si algo no se podía explicar con sencillez, a Fermi no le interesaba."

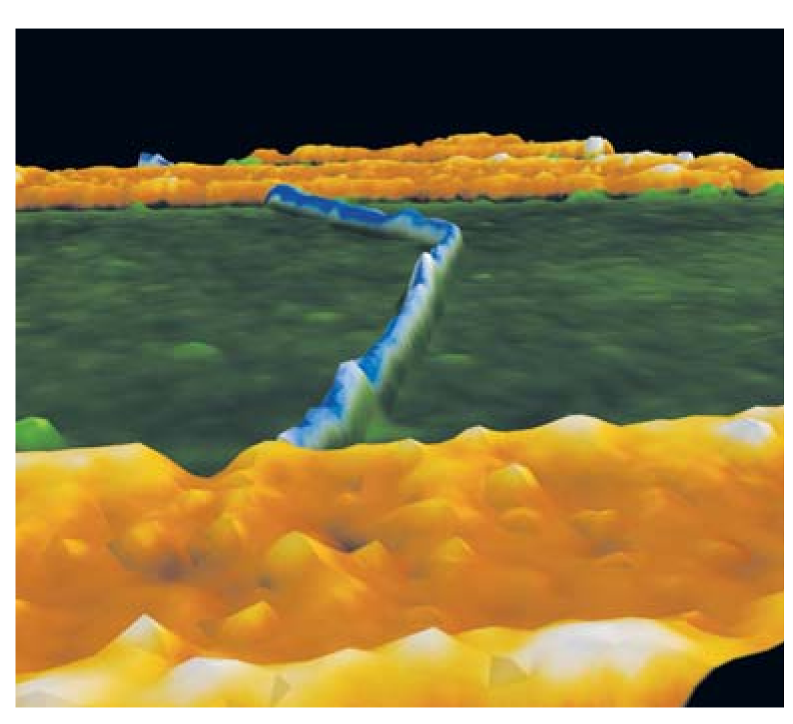
Conoció a su marido en 1956, en Chicago, el físico del estado sólido Gene F. Dresselhaus. Cuatro años más



Mildred S. Dresselhaus es una destacada investigadora de la física del carbono. Recibió la Medalla Nacional estadounidense de la Ciencia en 1990 y tiene 17 doctorados honoris causa. Ha desempeñado además importantes cometidos relacionados con la política científica

tarde los Dresselhaus habían conseguido sendas plazas en los Laboratorios Lincoln del MIT. Era un buen lugar para trabajar, recuerda, "pero había un inconveniente: yo tenía que entrar a las ocho de la mañana", cosa nada fácil con cuatro hijos. Por fin halló refugio en una plaza de profesora visitante del departamento de electricidad; convertida en plaza estable un año más tarde. En 1985 se le otorgaba una cátedra del Instituto, máxima distinción académica del MIT: sólo hay alrededor de una docena.

Dresselhaus se ha labrado su reputación en la física del carbono. Al principio de su carrera desveló los arcanos de la organización de los electrones en el grafito (técnicamente, la estructura de bandas electrónica). Descubrió que la identificación de electrones y huecos en el material —los huecos son cargas positivas creadas por la ausencia de electrones— había sido intercambiada; resolvió así diversas cuestiones a las que no se hallaba respuesta. Fue de los primeros en utilizar el láser en experimentos magneto-ópticos y precursora en la determinación de los mecanismos de transporte de calor y electricidad en algunos semimetales, como el vanadio y el niobio. Intervino también en la fundamentación de la física de la intercalación, el establecimiento de las propiedades de los materiales entreverados (por ejemplo, el grafito con capas de metales alcalinos).



Los nanotubos de carbono resultan prometedores, entre otras razones, porque tienen propiedades eléctricas diversas, como descubrió Dresselhaus. Aquí, un tubo (azul) *sirve de conexión de anchura nanométrica entre dos electrodos* (amarillo)

Durante los últimos diez años se ha centrado en el campo de los nanotubos de carbono, especialidad en la que, el pasado año, se han duplicado los artículos publicados; ahora salen anualmente más de 1500. En 1992 predijo, junto con su esposo y Riichiro Saito, de la Universidad de Electrocomunicaciones de Tokio, que los nanotubos de carbono podían ser tanto semiconductores como metales en función de sus características geométricas, una hipótesis extraordinaria confirmada por los experimentos en 1998.

"Esta especialidad anda ahora en ebullición", comenta; las aplicaciones posibles son múltiples: pantallas planas, almacenamiento de energía del hidrógeno, construcción de edificios y administración de fármacos. Los nanotubos prometen también mucho en electrónica; gracias a ellos se presagia una drástica disminución en la cantidad de cableado y dispositivos electrónicos emparejada a un aumento de la velocidad [*véase* "Introducción de los nanotubos en el dominio de la electrónica", por Philip G. Collins y Phaedon Avouris, en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA; febrero de 2001].

Ni siquiera mientras contribuía a sentar las bases del futuro de los nanotubos dejó de tener presente el espíritu de servicio como un aspecto más de la ciencia. "La carrera me costó en el Colegio Hunter cinco dólares por semestre, incluidas tutorías, prácticas de laboratorio y libros de texto en préstamo", señalaba en 1997, siendo presidenta de la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia (AAAS). "Los contribuyentes invirtieron en mí." Su elección como miembro de la Academia Nacional de Ingeniería en 1974 la incitó, reflexiona ahora, a comprometerse con la política científica. Ha sido presidenta de la Sociedad Americana de Física y tesorera de la Academia Nacional de Ciencias, por nombrar dos de los muchos puestos desde los que ha devuelto su deuda con los contribuyentes, con su disciplina y con la ciencia en general.

Su último nombramiento público entraba en vigor en agosto de 2000 y concluyó ese mismo noviembre, con las elecciones presidenciales. El ministro de Energía, Bill Richardson, le había pedido que dirigiera la Secretaría Científica de su ministerio, con un presupuesto de unos 3500 millones de euros y cinco laboratorios nacionales a su cargo. Aceptó, aunque eran los últimos días del gobierno de Clinton. "Luego vino un proceso de refrendo que resultó muy descorazonador, mucho." Se demoró 10 meses mientras las cámaras legislativas no se decidían. Sin razón justificable. "No tenía nada que ver conmigo, nada que ver con mi cargo, nada que ver con la ciencia. Así se hace la política."

Al final de su mandato el presidente Bill Clinton se interesó de manera especial por la ciencia: "Se dio cuenta de la relación entre la ciencia y la economía." Pero está decepcionada por la actitud del gobierno actual. "El presidente no tiene un gran interés personal en la ciencia, ni gente a su lado a quien le interese."

CIENCIA Y SOCIEDAD

Paleomadrigueras

Cambio climático en el Atacama

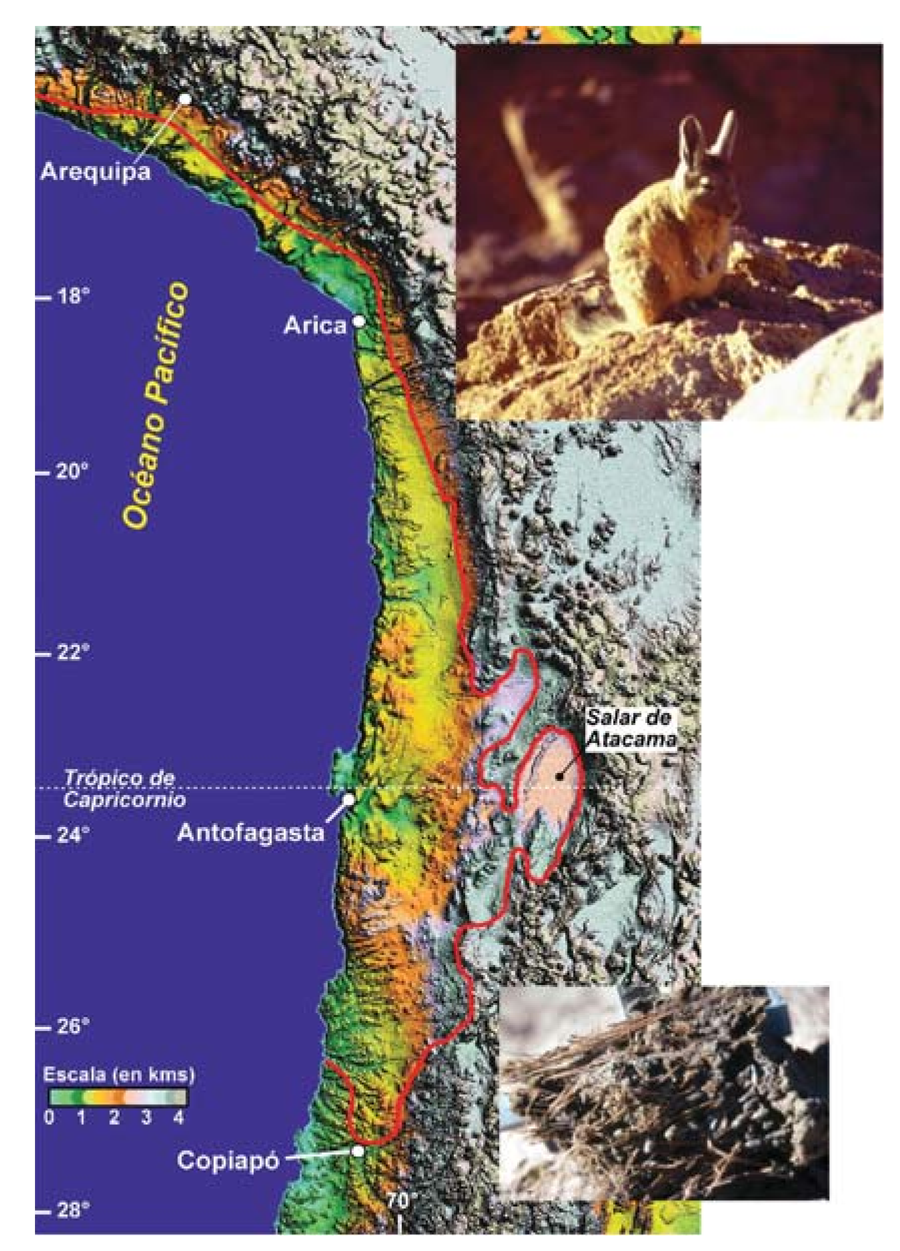
Entre la cordillera de los Andes y el océano Pacífico se extiende el desierto de Atacama, uno de los lugares más áridos del mundo. Bordeando la costa, se prolonga desde el norte del Perú hasta la ciudad chilena Copiapó. Abarca más de 22 grados de latitud. Sus sierras y pampas constituyen un desierto de aridez tan extrema, que no permite el crecimiento de plantas, salvo las asociadas a ríos y oasis permanentes. Nos hallamos ante un desierto "absoluto".

Con más de 25 millones de años de antigüedad, el desierto de Atacama persiste gracias a tres factores geológico-geográficos: la subsidencia de masas de aire, la surgencia de aguas frías de la corriente de Humboldt y la cordillera de los Andes.

Las masas de aire ascienden a la alta atmósfera, cerca del ecuador. Debido al giro del planeta, descienden en los subtrópicos e inhiben la evaporación y el transporte de masas de aire húmedo desde los océanos, produciendo zonas áridas en torno a la Tierra. La surgencia de aguas frías de la corriente de Humboldt (o del Perú) en la costa obstaculiza el transporte de aire húmedo desde el océano. Por fin, las altas cumbres de la cordillera de los Andes bloquean la humedad proveniente desde el Amazonas.

Las pocas precipitaciones que hoy caen en este desierto son lluvias torrenciales y nevazones del "invierno altiplánico" que llegan del Amazonas por el nordeste durante el verano y afectan la vertiente occidental de los Andes. Pueden deberse también a incursiones invernales de frentes polares que se dan en forma de nieve sobre las altas cumbres, con escasas lluvias a menor altura.

No obstante la extrema aridez hoy reinante, el registro geológico nos muestra un pasado más húmedo. La presencia de terrazas y playas elevadas sobre las superficies actuales de extensos salares y lagunas en el altiplano apunta a la existencia de vastos "paleolagos", producto de períodos en que las precipitaciones quizá fueron mucho más intensas. Tales cambios ocurrieron cuando



Modelo de elevación digital de la costa occidental de América del Sur con el límite superior de la porción del desierto de Atacama sin plantas (desierto absoluto) dibujado en rojo. Las pocas lluvias que aquí caen se concentran por sobre este límite y provienen del nordeste. La presencia de numerosas paleomadrigueras (foto inserta inferior, nótese la presencia de numerosas gramíneas)*, acumulaciones hechas por vizcachas* (foto inserta superior) *nos revelan la ubicación precisa de plantas en el pasado*

la Tierra se encontraba saliendo de un extenso período glacial, en que las temperaturas fueron más bajas que en la actualidad.

No sabemos con exactitud si los paleolagos se formaron por aumento en las precipitaciones, por una menor evaporación acorde con las temperaturas más bajas o por combinación de ambos factores. ¿Cómo podríamos analizar la influencia de cada uno de estos factores por separado?

La vegetación del Atacama nos brinda una clave. El desierto absoluto establece un claro límite inferior, donde las plantas, que existen en altura gracias al invierno altiplánico, no pueden ya soportar la extrema aridez. Las plantas que residen en este límite son, por lo tanto, sumamente sensibles a la cantidad de precipitaciones, pero resisten mejor las temperaturas (el límite incluso desciende en altitud a medida que se acerca al ecuador). Encontrar restos de plantas en el pasado por debajo de este límite constituiría un indicio claro del aumento de las precipitaciones.

Recientemente, un equipo de investigadores del Servicio Geológico de los Estados Unidos, la Universidad de Arizona y la Universidad de Chile descubrió en el desierto de Atacama madrigueras que fueron habitadas por roedores. La vizcacha (*Lagidium viscacia*) y el lauchón orejudo (varias especies del género *Phyllotis*) acumularon en sus cubiles heces, fragmentos vegetales, insectos y huesos que el tiempo se encargó de sellar en una matriz de orina cristalizada. Las plantas que se encuentran en las paleomadrigueras siempre son locales, ya que el rango de forrajeo del roedor es menor a 100 metros.

De acuerdo con los análisis de radiocarbono, las paleomadrigueras se remontaban miles de años atrás. La aplicación de esa técnica de datación arrojó edades más allá del límite práctico de la misma (40.000 años). Gracias al óptimo estado de conservación de las paleomadrigueras, favorecido por el ambiente hiperárido, pudimos identificar semillas, flores y hojas de muchas especies.

El examen de estos restos vegetales rindió unos resultados sorprendentes. Se comprobó que entre 11.800 y 10.500 años atrás hubo un período de precipitaciones de una intensidad de tres a cinco veces por encima de la media anual actual. Esto marcó el período más fértil que se haya visto en el desierto de Atacama durante los últimos 40.000 años, lapso de tiempo que se caracterizó por un descenso de casi 1000 metros de la estepa Altoandina, la migración septentrional de especies hoy ausentes en la zona y la presencia de una gramínea desconocida ahora en Chile.

La flora, además, nos dio la clave para resolver una cuestión importante: ¿cuál fue el origen de las lluvias, tropical o polar? La flora fósil de las paleomadrigueras, que incluía muchas especies de crecimiento estival, mostraba sin ambigüedad que las lluvias tuvieron un origen tropical.

Sin embargo, como toda prueba paleoclimática, ésta siempre nos revela una parte minúscula de la totalidad del problema. Si bien nuestros datos coincidían en algunos aspectos con registros del altiplano de Bolivia y Perú, las investigaciones realizadas por otros autores indicaban condiciones más áridas para este período. Hace 10.000 años, la cantidad de radiación solar (insolación) se encontraba en su mínima expresión respecto al presente sobre el trópico al sur del ecuador. Puesto que la migración meridional del sol, durante el verano austral, induce en buena medida el calentamiento del continente sudamericano y proporciona el "motor" para las lluvias, estos investigadores proponen que la fase prolongada de sequía observada para dicho intervalo se debió a la falta de "motor". Sin embargo, la fase lluviosa del Atacama indica que ocurrió lo contrario. ¿Cómo explicar, pues, esta fase?

Para nosotros, la solución ha sido recurrir a un motor de quizá mayor magnitud e impacto: el océano Pacífico. Es bien conocida la repercusión del fenómeno de El Niño en Sudamérica. Estas oscilaciones entre períodos cálidos y fríos del Pacífico producen déficits o excesos de lluvias según la región. En su fase fría, genera intensas lluvias sobre el altiplano y el alto Atacama. La fase lluviosa del Atacama duró más de 1000 años, un lapso de tiempo considerablemente mayor que las oscilaciones subdecadales tipo El Niño/La Niña. Pero este tipo de interacciones océano-continente, en que se considera la atmósfera sobre grandes distancias, nos proporcionan una idea de cómo se pueden generar lluvias sobre el Atacama (y el altiplano). Una interacción parecida entre el océano Pacífico y Sudamérica, que actúo a escala de milenios, asociada a las condiciones peculiares de un planeta que finalizaba una glaciación, pudo desencadenar las lluvias pleistocénicas del desierto de Atacama.

CLAUDIO LATORRE HIDALGO
Departamento de Biología,
Universidad de Chile

Química macromolecular

Quiralidad macroscópica y quiralidad molecular

Un objeto es quiral, o disimétrico, si al aplicarle la operación de inversión en el espacio se genera un objeto no idéntico. La quiralidad es una característica geométrica de la simetría del objeto. En razón de la misma, la imagen especular del objeto, a través de operaciones de traslación y rotación, no es superponible con éste.

Todo objeto asimétrico es también disimétrico, o quiral, pero no todo objeto simétrico es aquiral. Un objeto simétrico que carezca de planos internos de simetría o de reflexión-rotación es disimétrico. Por eso una espiral regular será quiral a pesar de tener un eje de simetría interno de segundo orden (*véase la figura 1*).

Dos objetos no idénticos que están en relación de imágenes especulares se denominan enantiómeros. Los enantiómeros presentan las mismas propiedades, excepto cuando interaccionan con otras moléculas quirales o con un campo de fuerzas quiral (por ejemplo, con la luz polarizada circularmente).

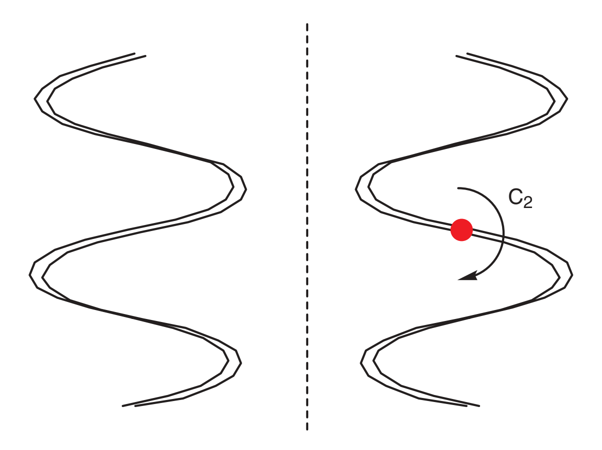
Llamamos molécula a una distribución estable de electrones alrededor de unos átomos. En su des-

cripción energética corresponde a una distribución del conjunto de sus electrones entendidos como ondas y no como partículas. La química usa una descripción estructural de las moléculas que es función del tipo de los átomos, o de grupos de átomos implicados, y del tipo de enlace que forman entre sí. Se trata, en realidad, de una descripción geométrica simplificada de la distribución de los electrones alrededor de los átomos de la molécula.

El arquetipo de moléculas disimétricas o quirales son las originadas por la coordinación tetraédrica del átomo de carbono con cuatro substituyentes distintos. A este tipo de moléculas asimétricas corresponden los aminoácidos e hidratos de carbono; con ellos se forman biopolímeros esenciales para la vida.

La quiralidad de los centros asimétricos determina que el biopolímero adquiera una geometría también quiral. Dicho de otro modo, la quiralidad de los centros asimétricos del biopolímero determina que el polímero adquiera una quiralidad a una escala superior de tamaño, en este caso varios órdenes de magnitud mayor que la de los elementos monoméricos que componen el polímero. Existe, por tanto, una transmisión de la quiralidad local de los fragmentos que componen el polímero hacia escalas de tamaño superiores.

Las moléculas fundamentales de los procesos biológicos, además de ser quirales, presentan el mismo tipo de quiralidad (enantiómeros del “mismo signo”); ese dato pone de manifiesto el origen común de todas las especies terrestres. Existe, por otro lado, una disimetría intrínseca del universo, puesto que los átomos y algunas partículas elementales son quirales y además todas ellas homoquirales. De la conjunción de ambos hechos se desprende que la disimetría es una característica esencial en la evolución (cosmológica, química y biológica) y sugiere que existe una relación entre la disimetría a nivel atómico y la del nivel macroscópico (objetos y sistemas biológicos).



1. Dos espirales enantioméricas. Se hallan en relación de imágenes especulares, no superponibles por operaciones de traslación y rotación. Se distinguen sólo en el sentido de giro, al avanzar siguiendo el trazo de una espira. En uno de los enantiómeros se indica uno de los infinitos ejes de simetría binarios contenidos en un plano perpendicular a la espira

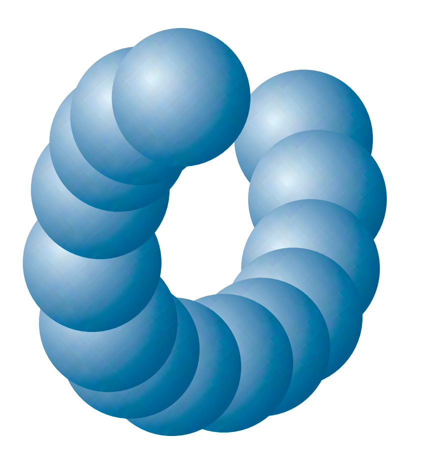
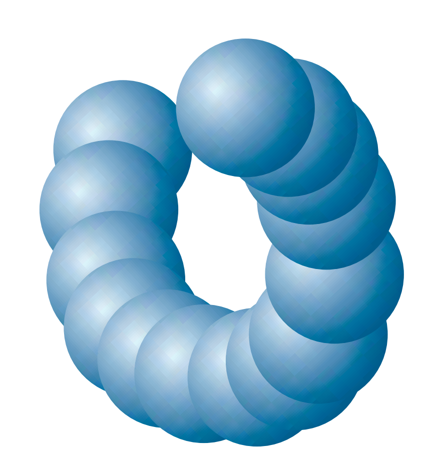
En los fenómenos de replicación y reproducción biológica, la función de la quiralidad se expresa en el intercambio molecular de información a través de procesos de asociaciones, temporales o permanentes, de moléculas y biopolímeros. Esta información viene dada por la distribución electrónica de las especies implicadas. La especificidad de la distribución electrónica, es decir, la información contenida en la molécula, aumenta con la quiralidad y se incrementa de forma cooperativa en el caso de interacciones múltiples, como las que ocurren entre los biopolímeros durante los procesos de replicación y reproducción. Aquí la información que transmite la quiralidad se detecta también en sentido inverso: desde el orden de escala microscópico hacia el molecular (nanoscópico).

El estudio del comportamiento de los sistemas biológicos ha dado origen a la química supramolecular, que se ocupa de entidades supramoleculares compuestas por “unidades” moleculares. Pueden obtenerse sistemas supramoleculares por autoensamblaje de entidades menores. En ese proceso se forman bloques moleculares mediante fuerzas de unión cuyas energías son muy inferiores a las que originan los enlaces moleculares, si bien al actuar de modo cooperativo construyen estructuras macromoleculares. A través de procesos de autoensamblaje la naturaleza procede a la organización y reproducción de sistemas biológicos, que corresponden a estructuras supramoleculares extremadamente complejas y adaptadas a la ejecución de distintas funciones. Los orgánulos celulares y las propias células se convierten así en sistemas supramoleculares ideales.

Los procesos de autoensamblaje que permiten la “construcción” de sistemas complejos y multifuncionales pueden generar estructuras jerarquizadas. En estos casos se presenta una jerarquía entre los componentes del sistema, desde los bloques primarios hasta el orden más alto de organización, pasando por los bloques secundarios y demás pasos intermedios.

En el intercambio de información entre bloques durante el proceso de autoensamblaje revisten importancia primordial las condiciones de simetría de los protagonistas y del mecanismo implicado. En ese contexto, la preparación de sistemas supramoleculares quirales y el estudio del papel de la quiralidad y de polarizaciones quirales durante los procesos de autoensamblaje se convertirán probablemente en uno de los temas más interesantes de la nueva química. Esta dedica un especial esfuerzo al estudio de las fases intermedias entre soluciones y fases sólidas, mayor incluso que el puesto en el estudio de especies moleculares en solución, que es lo que ha venido haciendo de manera casi exclusiva la química clásica.

El autoensamblaje de bloques hasta construir una estructura supramolecular resulta de dos tipos de procesos distintos: el generado por la cinética de la difusión de materia hacia los centros de crecimiento, en donde pueden intervenir efectos y fuerzas a nivel macroscópico, y el determinado por la dinámica de crecimiento a nivel de nanoescala. En virtud del primero, el sistema tiende hacia estructuras irregulares de superficie interfacial máxima; en el segundo tipo, las interacciones moleculares entre bloques determinan geometrías definidas de creci-

2. Las moléculas aquirales, o asociaciones de moléculas aquirales (representadas aquí por discos)*, pueden organizarse en estructuras aquirales (una ordenación lineal) o quirales* (las espirales de la figura, que representan a dos enantiómeros)*. En la organización quiral, se obtiene o una mezcla a partes iguales de las dos organizaciones enantioméricas o el predominio de uno de los signos de quiralidad. En el último caso no existe selección del signo de quiralidad; cada experimento resultaría en un signo de quiralidad determinado al azar. La selección del signo de quiralidad sólo puede conseguirse mediante una polarización quiral que actúe sobre el proceso de formación de la estructura quiral. Una polarización quiral puede obtenerse con el "dopaje" con una especie quiral o la actuación de un campo de fuerzas quiral durante el proceso de autoensamblaje*

miento. La forma de la estructura resultante será consecuencia de la competición entre estas dos tendencias.

Merced a dicha competición, se produce en el proceso de crecimiento un intercambio de información entre las escalas macroscópica y microscópica. Las uniones y geometrías a nivel atómico pueden determinar la geometría macroscópica de la escala más alta del sistema supramolecular, de la mesofase; pero también las fuerzas que actúan a nivel macroscópico pueden determinar el tipo de unión y geometría a nivel molecular. Esa segunda posibilidad reviste interés por lo que se refiere a la quiralidad, una propiedad geométrica.

Abundan las pruebas experimentales de la transmisión de información de la disimetría molecular hacia el nivel macroscópico. Lo observamos en las estructuras quirales macroscópicas de los depósitos minerales de ciertos organismos: la concha de un caracol, aquiral en su estructura molecular, es quiral en su forma macroscópica. La influencia de la quiralidad de proteínas y aminoácidos, al actuar en los centros de crecimiento, determina la formación de conchas de forma quiral.

Los ejemplos experimentales de la vía inversa de intercambio, es decir, del efecto de fuerzas macroscópicas sobre la quiralidad en las conexiones entre los bloques elementales de la estructura supramolecular, aunque teóricamente aceptados, son muy raros. Una excepción la tenemos en la selección del signo de quiralidad en el autoensamblaje de agregados de ciertas porfirinas solubles en agua; se consigue mediante el sentido de giro de la agitación de la solución en donde se produce la agregación.

En la preparación de materiales avanzados se aplican ya procesos basados en el autoensamblaje. Las propiedades no estructurales de los materiales, las más interesantes en el campo de la materia blanda ("soft materials"), dependen de la simetría de los mismos; la disimetría es una propiedad deseada. A modo de ejemplo, la ferroelectricidad en cristales líquidos se genera cuando el material es quiral.

Las estructuras supramoleculares formadas por autoensamblaje de unidades moleculares quirales serán necesariamente quirales, pero las supramoléculas constituidas por unidades aquirales pueden llegar a ser quirales (*véase la figura 2*). Se trata de una situación buscada por el investigador. El estudio de los factores que determinan la formación de supramoléculas quirales a partir de elementos aquirales es un campo de trabajo de gran interés y que experimentará una rápida expansión.

En particular la atención se centrará en el estudio de procesos para la selección del signo de quiralidad, en donde, además de los efectos moleculares (con el dopaje con especies quirales, por ejemplo), habrá que tener en cuenta el uso de fuerzas quirales que actúen sobre las cinéticas de difusión a nivel macroscópico; piénsese en las condiciones experimentales de tipo "macroscópico", como la agitación del sistema.

JOSEP M.ª RIBÓ
Dpto. de Química Orgánica.
Universidad de Barcelona

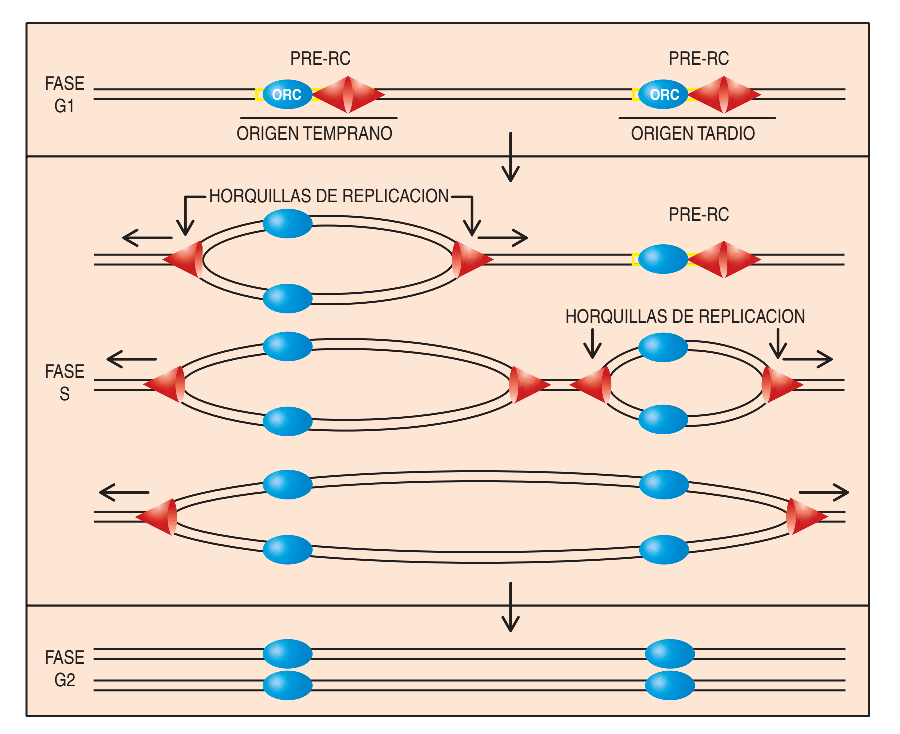
ADN dañado

Regulación de la replicación cromosómica

El ADN, la molécula que contiene la información genética, está repartido y empaquetado en los cromosomas. En cada ciclo de división celular, las células eucariotas deben transmitir de forma precisa su material genético a las células hijas; para ello han de duplicar sus cromosomas y distribuirlos en dos copias idénticas. Cualquier fallo en este proceso es potencialmente catastrófico, ya que puede dar origen a alteraciones en el genoma que desempeñan un importante papel en el desarrollo de una célula tumoral.

Existen mecanismos para controlar que la replicación cromosómica ocurra de forma completa y sin errores, en el momento adecuado (en la fase S del ciclo celular) y sólo una vez por ciclo. Debido a su importancia, estos mecanismos se han conservado durante la evolución, desde eucariotas unicelulares, como las levaduras, hasta humanos.

Podemos, por tanto, estudiar estos procesos en un modelo de la senci-



1. Esquema sobre el proceso de replicación cromosómica. El complejo polipeptídico ORC (en azul) *reconoce los orígenes de replicación y permanece unido a ellos durante todo el ciclo celular. Los complejos pre-replicativos (Pre-RC) se ensamblan al final de la mitosis y durante la fase G1; los orígenes de replicación se activan durante la fase S a distintos tiempos formándose las horquillas de replicación. La replicación del ADN ocurre de forma bidireccional desde cada origen durante la fase S. En la fase G2 todo el genoma se encuentra duplicado y listo para distribuirse en dos copias idénticas durante la mitosis*

llez de la levadura *Saccharomyces cerevisiae* y, en la mayoría de los casos, extrapolar los conocimientos adquiridos a sistemas más complejos, células humanas incluidas.

En las células eucariotas la replicación del material genético comienza en múltiples regiones del ADN denominadas orígenes de replicación. En *S. cerevisiae* hay aproximadamente 400 orígenes de replicación, lo que permite replicar su genoma en 20-30 minutos, mucho más rápido que si la replicación ocurriera desde un único origen por cromosoma. No obstante, la replicación del ADN no empieza en todos los orígenes al mismo tiempo. De forma programada, unos orígenes se activan en los inicios de la fase S y otros avanzada ésta.

Los orígenes de replicación son reconocidos por un complejo polipeptídico (ORC), que permanece unido a los mismos durante todo el ciclo celular. El complejo ORC se requiere para la posterior unión de un conjunto de proteínas que formarán el complejo pre-replicativo (Pre-RC), necesario para la activación de los orígenes.

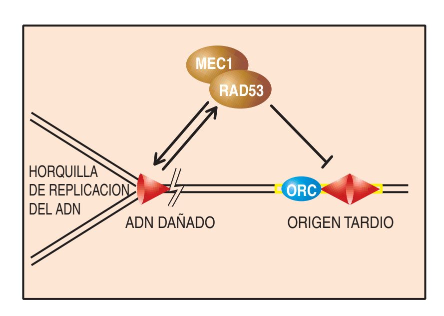
Cuando las células alcanzan el estado metabólico apropiado, los orígenes de replicación se activan en presencia de proteínas quinasas específicas, la doble hélice del ADN se desenrolla y la maquinaria de replicación se une al ADN, estableciéndose la horquilla de replicación. Un grupo de proteínas, entre las que se encuentran las ADN-polimerasas, formarán parte de las horquillas de replicación y replicarán bidireccionalmente el ADN desde cada origen, avanzando a lo largo del cromosoma hasta que encuentren otra horquilla, proveniente del origen de replicación más próximo.

El desplazamiento de las horquillas de replicación del ADN a lo largo del cromosoma no es una operación sencilla. Además de la complejidad del proceso de replicación del ADN en sí mismo, el material genético sufre daños espontáneos e inducidos. Las células son especialmente vulnerables en el momento de la replicación. Deben evitar que, durante el proceso de copia, se introduzca cualquier error transmisible a las células hijas, así como cualquier pérdida de información genética.

Por lo tanto, es importante la identificación y reparación del ADN dañado antes de que se replique y pueda inducir errores. Los seres vivos han desarrollado mecanismos de vigilancia ("checkpoints"), que detectan cualquier alteración en el ADN y no permiten que progrese el ciclo celular hasta que se solucione el problema.

Amanda Paulovich y Leland Hartwell (este último premio Nobel de fisiología y medicina del año pasado) describieron en 1995 uno de estos mecanismos, el mecanismo de vigilancia de la fase S. Trabajando con *S. cerevisiae*, observaron que, en presencia de agentes alquilantes que dañan el ADN, como el metilmetanosulfonato, la fase S es extremadamente larga (varias horas), en comparación con la replicación del ADN en ausencia de agentes tóxicos. Además, descubrieron que la extensión de la fase S, que permite a las células tiempo suficiente para que la reparación del ADN se lleve a cabo, se debe a la acción de dos quinasas, productos de los genes *MEC1* y *RAD53*.

¿Cómo funciona el mecanismo de vigilancia ("checkpoint") de la fase S? ¿Qué papel desempeñan las proteínas codificadas por *MEC1* y *RAD53*? Recientemente se han llevado a cabo algunos progresos que nos permiten comprender mejor el mecanismo del que se valen las células para afrontar el daño causado en el ADN. Cuando el material genético ha sufrido una alteración, por ejemplo por alquilación, las horquillas de replicación se mueven muy despacio, 5-10 veces más lentas que en ausencia de daño. Además, en respuesta a la lesión, o también en el caso de que las horquillas se paren antes de que se complete la replicación cromosómica, las proteínas Mec1 y Rad53 inhiben la activación de los orígenes que intervienen avanzada la fase S. Resultado de ello, hay menos horquillas de replicación. Esta situación, junto con



2. En respuesta al daño en el ADN, o si las horquillas de replicación se paran antes de terminar la replicación, el mecanismo de vigilancia mediado por Mec1/Rad53 inhibe la activación de los orígenes de replicación tardíos y desempeña un papel activo sobre las horquillas de replicación. Mantiene su integridad y probablemente facilita la reparación del ADN, haciendo así posible que la replicación cromosómica suceda de forma satisfactoria

la ralentización de la replicación, facilita la acción de la maquinaria de reparación para corregir la lesión. Aunque se necesita mucho más tiempo del habitual, todo el genoma se replica de forma correcta.

¿Qué ocurre si *MEC1* o *RAD53* no funcionan adecuadamente? En células mutantes de *mec1* o *rad53*, cuando el ADN se daña por agentes alquilantes, no puede inhibirse la activación de los orígenes de replicación tardíos. Como consecuencia se incrementa el número de horquillas de replicación que se desplazan a lo largo del ADN. Aunque estas horquillas también se mueven despacio, son ahora muy inestables; se rompen con una frecuencia muy alta cuando se encuentran con una lesión en la molécula de ADN. En consecuencia, no pueden moverse de forma eficiente a lo largo del cromosoma, ni pueden replicar todo el material genético. De ello se infiere que las proteínas cifradas por *MEC1* y *RAD53* son absolutamente necesarias para estabilizar las horquillas de replicación cuando éstas se desplazan a través de un ADN con lesiones.

Las proteínas Mec1 y Rad53 no se limitan a impedir la progresión del ciclo celular. Promueven que las células hagan frente al daño. Si fracasan en ese empeño, las horquillas de replicación se desploman ("colapsan") de forma irreversible; las células mueren.

Dado su enorme interés, los principales mecanismos de control se han conservado en el curso de la evolución. Existen homólogos de *MEC1* y de *RAD53* en células humanas, *ATR* y *CHK2* respectivamente. La mayoría de las células tumorales presentan defectos en la regulación de sus mecanismos de vigilancia. Muestran alteraciones que se deben a su mermada capacidad para regular el ciclo celular y responder al daño en sus cromosomas. El lado positivo es que muchos fármacos que se utilizan en los tratamientos contra el cáncer funcionan precisamente dañando el ADN o bloqueando la replicación del ADN.

El trabajo reciente llevado a cabo en levaduras podría explicar la sensibilidad de las células tumorales a estos agentes quimioterapéuticos y contribuir a mejorar su eficacia. Pensamos, por tanto, que la investigación sobre los mecanismos de vigilancia de la fase S repercutirá en el progreso del tratamiento del cáncer.

José Antonio Tercero
y John F. X. Diffley
Cancer Research UK,
Clare Hall Laboratories
South Mimms, Herts, Reino Unido

El sorgo

Y sus virus

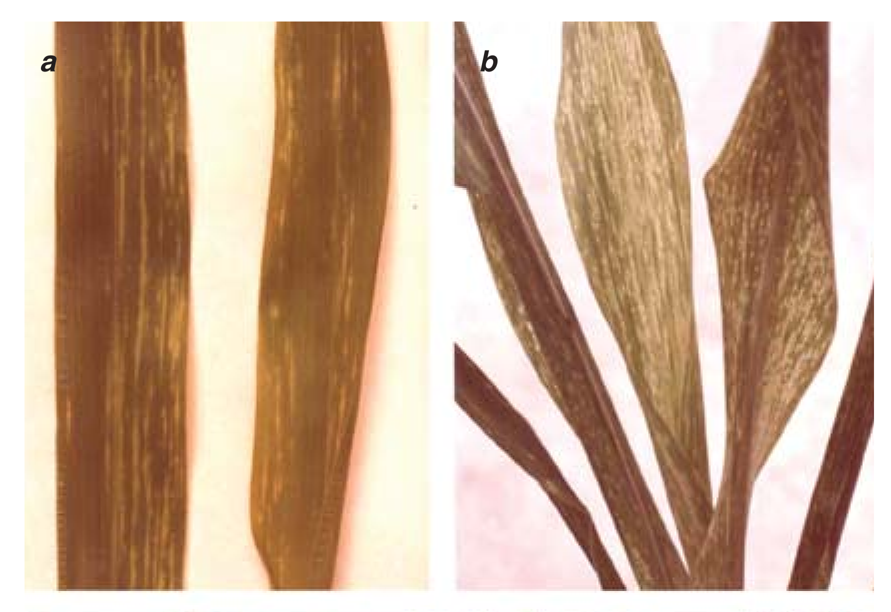
Entre las gramíneas cultivadas por el valor nutritivo de sus semillas destaca el sorgo. Se trata, empero, de una planta muy vulnerable. Se admite que hay unos 27 virus patógenos del sorgo. De ellos, 14 lo infectarían en condiciones naturales y 13, que se sepa, bajo condiciones experimentales. Las investigaciones realizadas en Venezuela han permitido identificar cinco virus que atacan al sorgo de ese país del Caribe: virus del mosaico de la caña de azúcar, virus del mosaico enanizante del maíz, virus del estriado del maíz, virus del mosaico del pasto johnson y virus del bandeado amarillo del sorgo. De ellos vamos a ocuparnos.

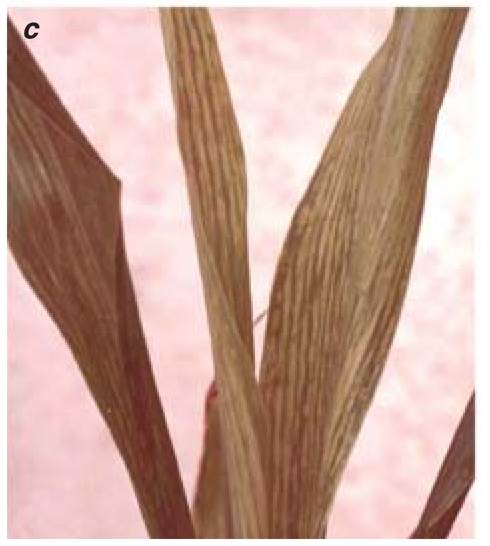
De todos los que causan enfermedades en gramíneas, el virus del mosaico de la caña de azúcar (VMCA) es, a buen seguro, el más cosmopolita. Aunque la primera cita de su presencia en sorgo venezolano se remonta a 1969, se había señalado ya en 1927 su agresión a la caña de azúcar. El VMCA infecta al sorgo, maíz, caña de azúcar y numerosas gramíneas silvestres. Pero el trigo, cebada, arroz y centeno suelen hallarse exentos. El virus produce en el sorgo los síntomas característicos de mosaico, moteado, estrías cloróticas y rojizas, necrosis y enanismo.

Este miembro del grupo potyvirus se transmite con facilidad por inoculación mecánica y por varias especies de áfidos (pulgones), pero no a través de la semilla. Se han descrito por lo menos 13 razas del VMCA. Todas infectan al sorgo. En Venezuela se han identificado las razas A, B, H, D y MB; de éstas, sólo la D y la MB infectan a nuestro cereal en condiciones naturales. Hasta la fecha, el control de vectores ha resultado, además de caro, ineficaz. La mejor medida es el uso de híbridos o variedades resistentes o tolerantes. El rendimiento total en granos de sorgo decae de una manera significativa con la infección.

Pero es el virus del mosaico enanizante del maíz (VMEM) el que causa la enfermedad vírica más importante del sorgo en Venezuela. Los síntomas inducidos incluyen achaparramiento, mosaico, enrojecimiento foliar, estrías cloróticas, retardo en la floración, amarillamiento, moteado, reducción en el tamaño y calidad de la semilla, reducción en el rendimiento y muerte de algunos genotipos. En cultivares susceptibles puede causar hasta el 100 % de pérdidas, si la infección ocurre en los primeros estadios de crecimiento de la planta.

Pertenece también al grupo potyvirus. Las razas que se conocen actualmente de este virus son A, D, E, F y V. En Venezuela atacan el sorgo las razas A y V. Aunque el rango de huéspedes está restringido a las gramíneas, ni el trigo, ni la







Principales síntomas inducidos por los virus que infectan al sorgo: a) *estrías cloróticas;* b) *mosaico severo;* c) *bandas cloróticas;* d) *estrías y bandas cloróticas acompañadas de necrosis*

cebada, ni la avena, ni el centeno, ni el arroz son huéspedes del virus.

El VMEM se transmite por inoculación con savia y por más de 20 especies de áfidos. Si bien se introduce también a través de la semilla, lo hace en proporción muy baja. En Venezuela, la V constituye la raza más diseminada del virus. Tiene como huéspedes naturales a las gramíneas falso johnson, falsa pata de gallina, paja de conejo, paja peluda y pasto johnson. Las medidas comunes de control del VMEM incluyen el uso de cultivares resistentes o tolerantes, erradicación del pasto johnson, eliminación de insectos vectores y cambios en la época de siembra.

Al virus del estriado del maíz (VEM) se le llama en Venezuela "virus de la hoja blanca". Consta de una nucleoproteína filamentosa que mide unos tres nanómetros de diámetro. Este tenuivirus, transmitido por el saltahojas *Peregrinus maidis*, lo retiene el vector después de la muda, se multiplica en el insecto y se traspasa congénitamente a la progenie a través de los huevos. No se transmite por métodos mecánicos, ni por contacto entre plantas, semillas o polen.

Las plantas de sorgo afectadas presentan estrías cloróticas interrumpidas, que algunas veces coalescen y forman bandas cloróticas o blanquecinas a lo largo de casi toda la hoja; las panículas son de menor tamaño y las plantas presentan un ligero achaparramiento.

El virus del mosaico del pasto johnson (VMPJ) infecta al pasto johnson, maíz, sorgo, avena y muchas otras gramíneas anuales y perennes. Tales plantas constituyen importantes reservorios naturales del virus. Los síntomas producidos en algunos cultivares comerciales de sorgo forrajero y granero son el mosaico, los puntos necróticos y, en alguna ocasión, el achaparramiento.

Actualmente se conocen tres razas de este virus: Jg, KS1 y O. En Venezuela la raza O ataca al sorgo. El VMPJ, integrado en el grupo de los potyvirus, se caracteriza por producir inclusiones en forma de molinetes en las células infectadas. Se transmite mecánicamente y por varias especies de áfidos, aunque no a través de la semilla de maíz dulce.

El virus del bandeado amarillo del sorgo (VBAS) se ha detectado en Venezuela infectando sorgo forrajero y sorgo granero. Induce en las plantas estrías y bandas cloróticas, enanismo, necrosis sistémica y muerte. Se transmite mecánicamente con dificultad. Los síntomas aparecen 15-25 días después de la inoculación. Hasta el momento no se le conocen vectores.

El VBAS presenta partículas isométricas de 25 nm de diámetro. Aunque limitado a las gramíneas, no está relacionado serológicamente con otros virus que infectan a esa familia de plantas. Muestra una alta estabilidad en savia, pero no se transmite a través de la semilla de sorgo. En Venezuela tiene como hospedantes naturales al pasto johnson y al falso johnson. Ofrece la particularidad de infectar algunas líneas de sorgo como la QL-3, que es inmune a todas las razas del VMEM y VMCA conocidas, y que son utilizadas como fuente de resistencia en los programas de mejora del sorgo.

MARIO JOSÉ GARRIDO
Instituto de Botánica Agrícola
y Dpto. de Química y Tecnología,
Facultad de Agronomía,
Universidad Central
de Venezuela

Música

Sustrato biológico

La música ha acompañado al hombre desde los albores de su evolución cultural. Hay quienes afirman que pudo anteceder a la aparición del lenguaje. Con sus infinitas variedades, ha desempeñado un papel fundamental en todos los grupos sociales y a lo largo de la historia, en clara manifestación de que el hombre posee una necesidad intrínseca de crear, reproducir y escuchar música. A pesar de ello, esta forma cifrada de sonidos engarzados que llamamos música permanece como un gran enigma tanto en su significado como en su origen.

Matemáticos y filósofos de la naturaleza, desde Pitágoras hasta Kepler y Newton, la consideraron expresión armónica del orden matemático del universo, "la música de las esferas". Actualmente se acepta que la música es una forma de comunicación que, a diferencia del lenguaje, no transmite mensajes objetivos sino emocionales. Por ello, los neurobiólogos, psicólogos, lingüistas, musicólogos y biólogos evolucionistas han emprendido numerosas investigaciones encaminadas a desenmarañar el misterio que encierra el arte musical.

Parten de la idea según la cual toda actividad humana compleja tiene su origen en procesos biológicos necesarios para la supervivencia y la adaptación. Los estudios se han centrado a menudo en especies que producen sonidos "musicales", como las aves y las ballenas. Los cantos de muchas aves, así como los de los cetáceos, desempeñan un papel fundamental en la comunicación intraespecífica durante el cortejo, en la delimitación del territorio o en advertencia del peligro.

Apoyados en el análisis de las secuencias sonoras que emiten estos animales, algunos investigadores proponen que esos sonidos son frases musicales que muestran notable parecido con los patrones de la música, en tono, ritmo y secuencia. Se trata de una afirmación carente de base, pues ignora que nuestra escala sonora y las formas musicales han ido evolucionando con el tiempo.

Nos enseña la neurofisiología que los sujetos normales tenemos la capacidad innata de distinguir sonidos consonantes de los disonantes, fenómeno que puede observarse desde los cuatro meses de edad. Dicho de otro modo, nuestro cerebro está estructuralmente equipado para esa función desde que nacemos. Con el auxilio de la resonancia magnética funcional y la tomografía por emisión de positrones, se ha comprobado que, lejos de existir un centro cerebral para la música, como lo hay para el habla, su percepción se lleva a cabo en diferentes módulos de redes neuronales distribuidas en ambos hemisferios. El tono, el ritmo, la armonía y la sintaxis parecen procesarse en diferentes áreas de la corteza cerebral.

La identificación del síndrome de amusia congénita, que lo padecen quienes se sienten incapaces de entender la música, parece confirmar la existencia de vías neurológicas especializadas e independientes para la percepción musical, dañadas en tales individuos. Otra observación que apunta en el mismo sentido es la afasia musical que padecen quienes sufrieron algún trauma o una inflamación cerebrales; añádase que algunas formas de epilepsia temporal pueden ser desencadenadas por la música.

Demostradas las bases neurales de la percepción musical, queda por dilucidar si la habilidad musical del hombre es una actividad mental compleja que, en el curso de la evolución, surgió en otras especies ancestrales y se adoptó por los beneficios que reportaba para la supervivencia, o si se trata, por el contrario, de un fenómeno emergente y exclusivo de nuestra especie, como el pensamiento matemático o la ideación abstracta.

Y todavía ignoramos por qué el hombre, al escuchar la magia de una orquesta con sus creaciones musicales, vibra de emoción, mientras que el animal permanece indiferente.

*Notación musical de cantos de diferentes aves. Athanasius Kircher (1602-80). (*Musurgia Universalis*, I, p. 30)*

LUIS BENÍTEZ BRIBIESCA
Hospital de Oncología, IMSS,
México

Texto y fotos: Sergio Rossi y Neus Vert

Bajo las piedras

1. En la zona somera de la costa las rocas del fondo forman un microcosmos de vida

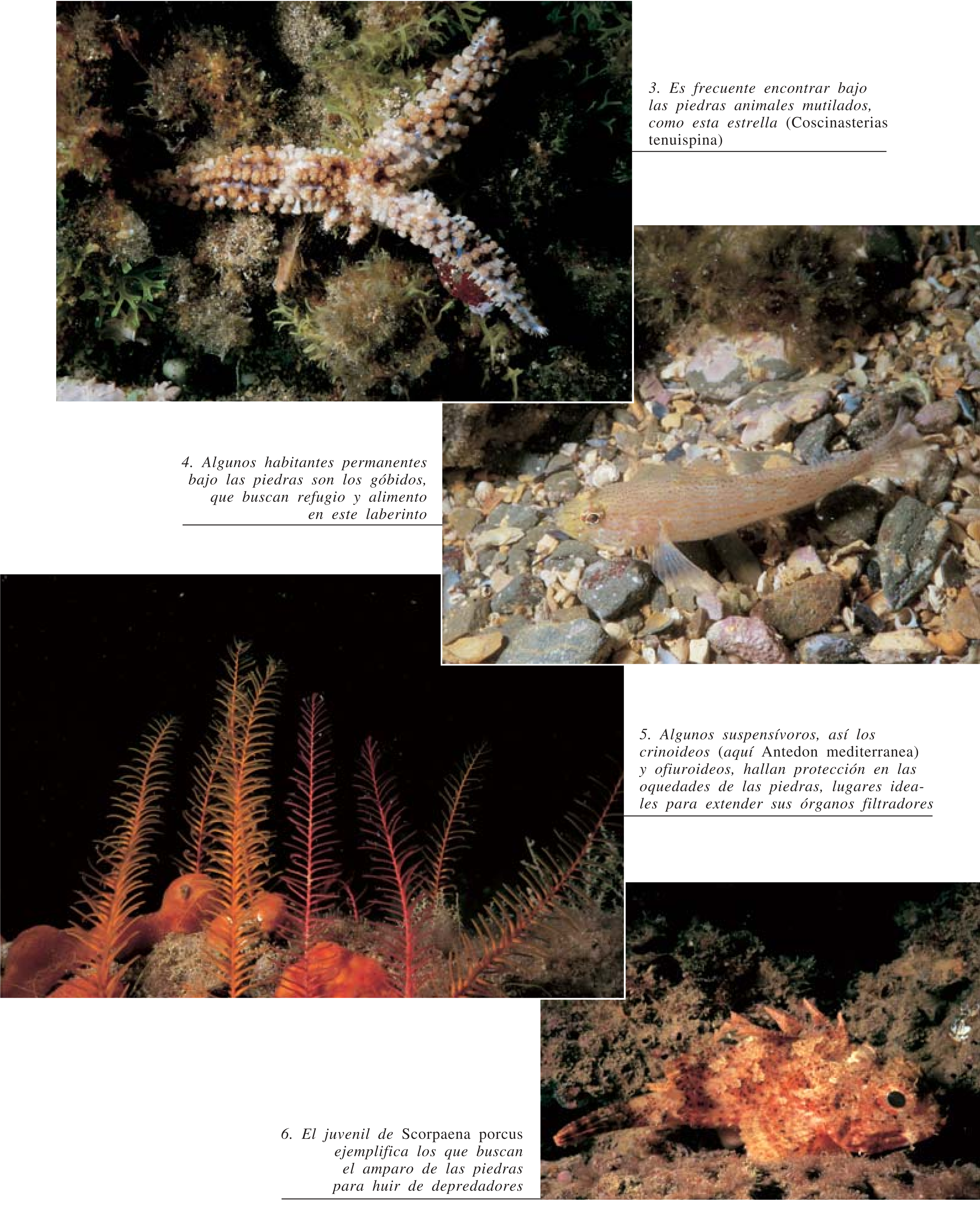
Uno de los hábitats marinos más cercanos y menos explorados es, quizás, el que encontramos bajo las piedras. Se esconde allí un mundo críptico donde los animales se aprovechan de la protección y de la disponibilidad de un medio no apto para todos. A la falta de luz, que excluye la presencia de algas, se suma la perturbación del substrato; en caso de tormenta la piedra del abrigo puede levantarse y dejar expuestos a sus moradores.

Por eso muchos de los animales allí instalados son móviles (erizos, estrellas de mar, peces, etcétera) o de vida efímera (hidrozoos, poliquetos serpúlidos, ascidias y otros). Frente a lo que pudiera imaginarse, no reina la paz, sino una dura lucha por ocupar un sitio en espacio tan preciado. Se forman primero biopelículas de bacterias y protozoos; pronto llegarán poliquetos serpúlidos, que desarrollan efímeras masas de tubos calcáreos rápidamente desplazados por otros filtradores (briozoos, ascidias o hidrozoos).

Si la piedra es suficientemente estable (lo que depende de la profundidad a la que se encuentre y de su tamaño para evitar ser volteada por el oleaje) otros organismos menos inquietos y más longevos expulsarán, a su vez, a los que ya empezaban a sentirse cómodos. Los hay, sin embargo, que están sencillamente de paso; utilizan las piedras de guardería a la que muchos depredadores no pueden acceder por obvios problemas de tamaño. Si levantamos una de esas piedras, observaremos, en efecto, una cantidad notable de cangrejos pequeños, minúsculos erizos y peces como el rascacio que pasarán las primeras etapas de su vida allí agazapados.



2. Estas delicadas formas de la ascidia Clavelina lepadiformis *viven suspendidas bajo una piedra, filtrando activamente las partículas en movimiento*



3. Es frecuente encontrar bajo las piedras animales mutilados, como esta estrella (Coscinasterias tenuispina)

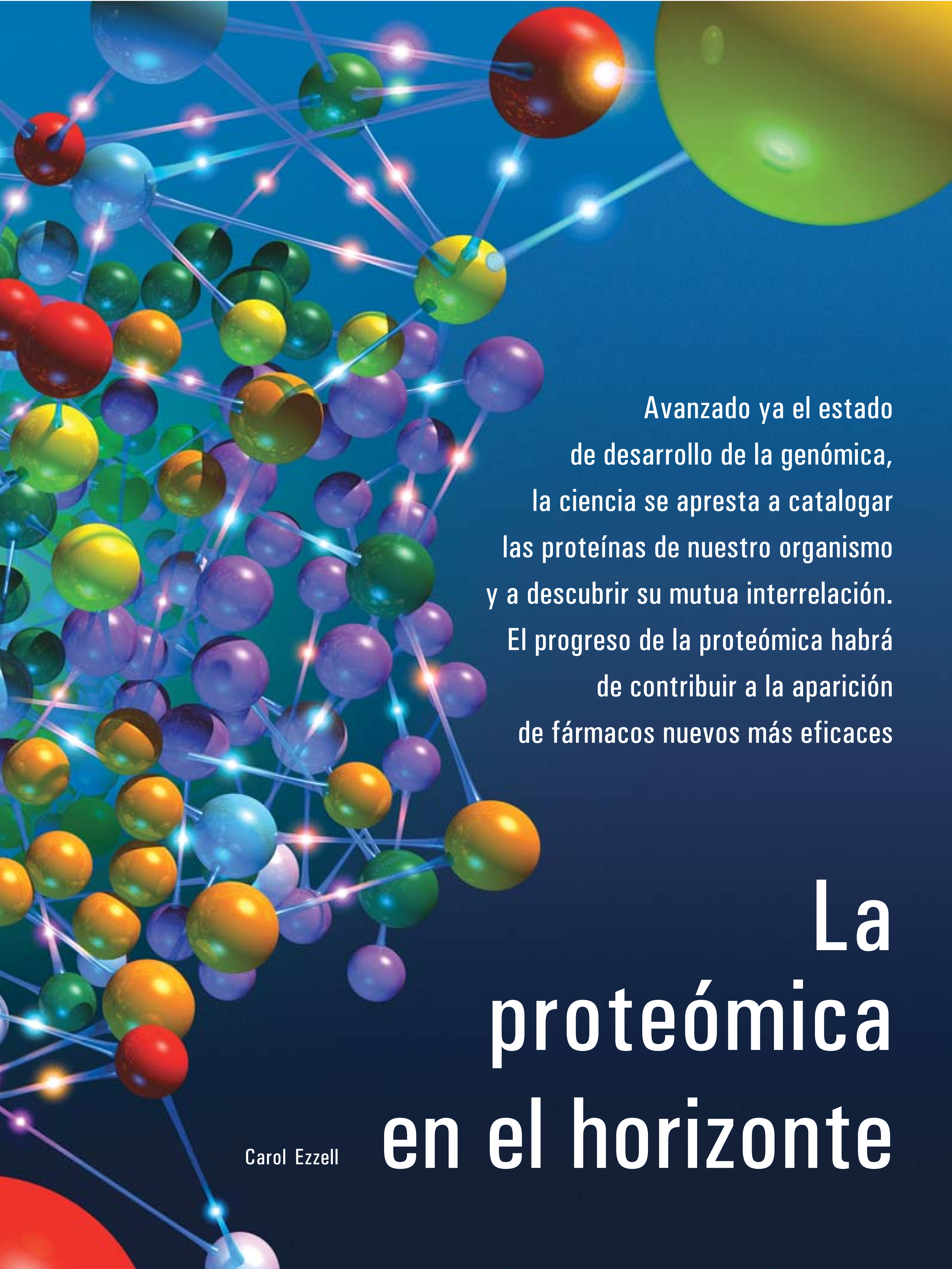
4. Algunos habitantes permanentes bajo las piedras son los góbidos, que buscan refugio y alimento en este laberinto

5. Algunos suspensívoros, así los crinoideos (aquí Antedon mediterranea) *y ofiuroideos, hallan protección en las oquedades de las piedras, lugares ideales para extender sus órganos filtradores*

6. El juvenil de Scorpaena porcus *ejemplifica los que buscan el amparo de las piedras para huir de depredadores*



1. LAS REDES de proteínas invaden todas las células.



Avanzado ya el estado de desarrollo de la genómica, la ciencia se apresta a catalogar las proteínas de nuestro organismo y a descubrir su mutua interrelación. El progreso de la proteómica habrá de contribuir a la aparición de fármacos nuevos más eficaces

La proteómica en el horizonte

Carol Ezzell

El genoma humano pronto saldrá del primer plano. La investigación se concentra ahora en el proteoma, el conjunto de las proteínas elaboradas por las células y los tejidos de nuestro cuerpo. El genoma —información genética completa del organismo— sólo ofrece las recetas para sintetizar proteínas. Estas son los verdaderos ladrillos y la argamasa con que se fabrican las células; asumen, además, la mayor parte del trabajo. Y son las proteínas las que diferencian los diversos tipos de células. Aunque todas las células compartan esencialmente el mismo genoma, pueden tener distintos genes en actividad y, por tanto, elaborar diferentes proteínas; del mismo modo, las células enfermas a menudo sintetizan proteínas que no se encuentran en células sanas, y viceversa.

Se comprende, pues, el nuevo afán por catalogar todas las proteínas humanas y descubrir sus interacciones mutuas. Con ello se pretende diseñar fármacos mejores y con menos efectos secundarios.

Alcanzar esa meta no será un juego de niños. El estudio de las proteínas entraña más dificultades que el de los genes. Las empresas del ramo siguen esforzándose en aportar a esta tarea las técnicas e instrumentos más perfeccionados. Sin embargo, la carrera ya ha comenzado: al menos una compañía promete descifrar de aquí a tres años el proteoma humano, paso importante para configurar la multitud de interacciones que existen entre las proteínas individuales. Mientras tanto, por ceñirnos a los Estados Unidos, hay programas federales que subvencionan investigaciones académicas sobre los proteomas de las células cancerosas y del suero, residuo líquido de la sangre humana al coagularse.

Se han logrado ya avances importantes. En enero dos equipos de investigadores anunciaron haber cartografiado las interacciones de todas las proteínas de la levadura del pan, modelo socorrido para el estudio de la biología celular. Otros comunicaron en febrero haber preparado, mediante técnicas proteómicas, una prueba segura para la detección precoz del cáncer de ovario.

La proteómica va a provocar una gran actividad comercial. El análisis de inversiones realizado por Frost & Sullivan estima que el mercado mundial de instrumentos, suministros y servicios de proteómica llegará en 2005 a 6360 millones de euros, habiendo partido de 795 millones nada más en 1999, y sin incluir ahí los beneficios generados por los fármacos y diagnósticos desarrollados por efecto de las técnicas proteómicas. La proteómica también puede ser vital para el futuro de la industria farmacéutica. El ramo invirtió 34.000 millones de euros en investigación y desarrollo durante 2000, pero sólo se aprobaron 30 fármacos en ese año.

Del genoma al proteoma

El término "proteoma" fue acuñado en 1994 por Marc R. Wilkins, de Proteome Systems en Sydney, para designar la totalidad de proteínas codificadas por un genoma. La exacta definición de "proteómica" varía según los autores, pero suele admitirse que engloba tres actividades principales: la identificación de todas las proteínas sintetizadas por una célula, tejido u organismo; la determinación del modo en que interaccionan estas proteínas para formar redes semejantes a circuitos eléctricos, y el trazado de las estructuras tridimensionales precisas de las proteínas como medio para encontrar su talón de Aquiles, es decir, dónde puedan ser desactivadas o activadas por la acción de fármacos.

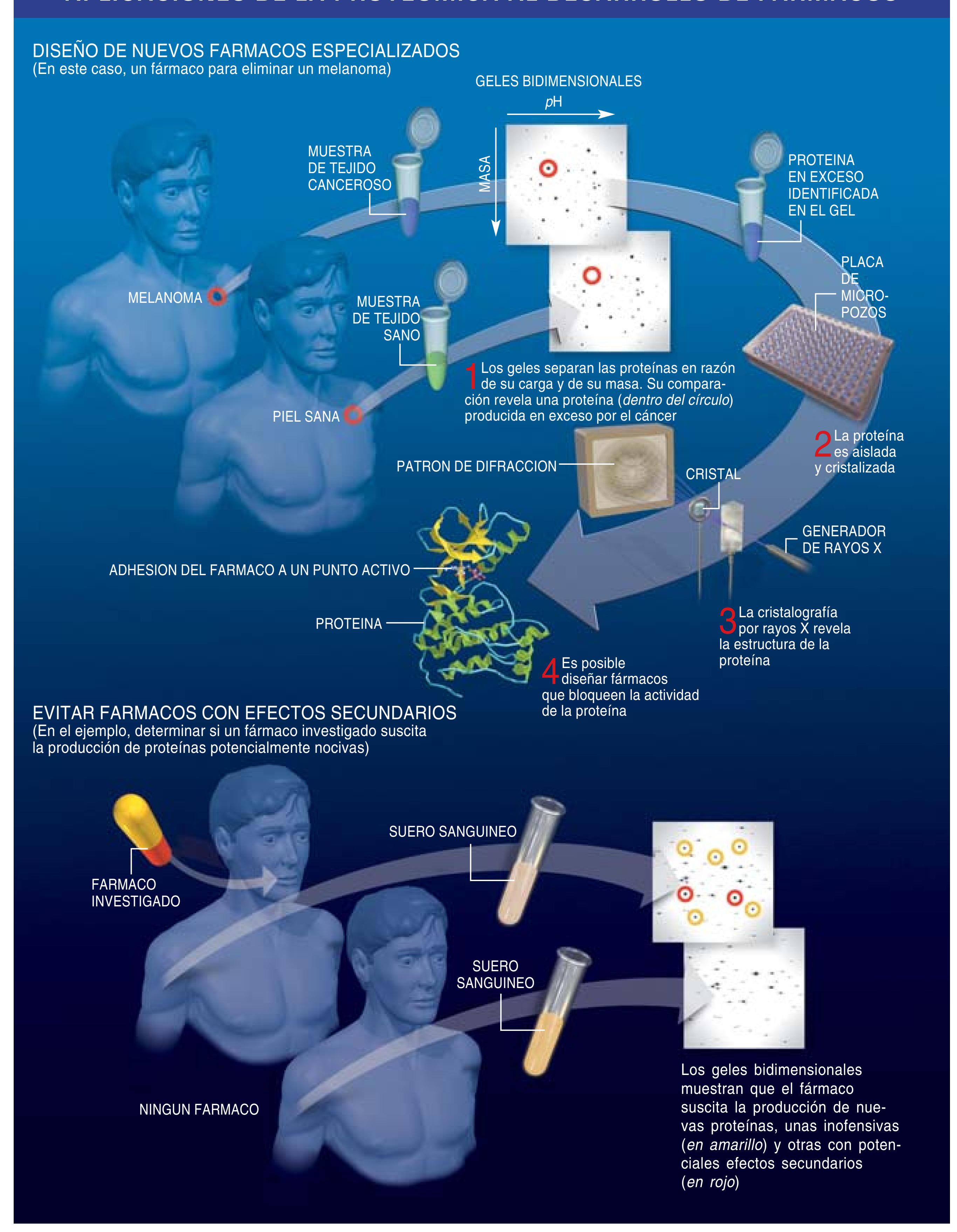
Estas tareas tal vez parezcan sencillas. Cuando se anunció la práctica terminación del Proyecto Genoma Humano daba la impresión de que, al conocer la secuencia de los aproximadamente 3000 millones de letras de código o pares de bases de ADN presentes en el genoma humano —y sobre todo las secuencias concretas de las unidades codificadoras de proteínas (los genes)— se llegaría a comprender las proteínas en sí mismas. Mas, por desgracia, el proteoma es mucho más complicado que el genoma.

El "alfabeto" del ADN consta de cuatro bases químicas denominadas por sus letras iniciales: adenina (A), citosina (C), guanina (G) y timina (T). Las proteínas, por el contrario, están formadas por 20 bloques constructivos llamados aminoácidos. Los genes especifican qué aminoácidos han de agruparse para constituir una determinada proteína. Pero aun conociendo la secuencia de aminoácidos de una proteína, de ello no se deduce necesariamente cuál es su función ni con qué proteínas se vincula. Tampoco puede predecirse su estructura tridimensional con absoluta certeza. A diferencia de los genes, que son lineales, las proteínas se pliegan y adoptan formas que a veces se apartan de lo esperado.

Por si fuera poco, las células suelen modificar las proteínas añadiéndoles azúcares, lípidos o ambos, de maneras también difíciles de prever. Para producir una proteína cifrada por un gen recién descubierto no basta con ensamblar las cadenas de aminoácidos en el orden que impone el gen; a menudo es preciso cerciorarse de que se incorporan las adecuadas modificaciones de lípidos y azúcares. Y para determinar el comportamiento de una proteína, se ha de tener en cuenta que algunas proteínas se di-

Resumen/Proteómica

- Completado ya el Proyecto Genoma Humano, la ciencia se apresta a descifrar las redes de proteínas en el interior de células y tejidos. Pero las proteínas son mucho más complejas que los genes y más difíciles de estudiar.
- Las empresas han invertido cientos de millones de euros en la producción de equipos de proteómica, investigación de fármacos y pruebas diagnósticas basadas en técnicas proteómicas.
- La determinación de la estructura tridimensional de las proteínas permite descubrir los puntos donde las proteínas son más sensibles a la acción de los fármacos.


APLICACIONES DE LA PROTEOMICA AL DESARROLLO DE FARMACOS
DISEÑO DE NUEVOS FARMACOS ESPECIALIZADOS
(En este caso, un fármaco para eliminar un melanoma)
GELES BIDIMENSIONALES
pH
MASA
MUESTRA DE TEJIDO CANCEROSO
PROTEINA EN EXCESO IDENTIFICADA EN EL GEL
MELANOMA
MUESTRA DE TEJIDO SANO
PLACA DE MICRO-POZOS
PIEL SANA
1 Los geles separan las proteínas en razón de su carga y de su masa. Su comparación revela una proteína (dentro del círculo) producida en exceso por el cáncer
2 La proteína es aislada y cristalizada
PATRON DE DIFRACCION
CRISTAL
GENERADOR DE RAYOS X
ADHESION DEL FARMACO A UN PUNTO ACTIVO
PROTEINA
3 La cristalografía por rayos X revela la estructura de la proteína
4 Es posible diseñar fármacos que bloqueen la actividad de la proteína
EVITAR FARMACOS CON EFECTOS SECUNDARIOS
(En el ejemplo, determinar si un fármaco investigado suscita la producción de proteínas potencialmente nocivas)
FARMACO INVESTIGADO
SUERO SANGUINEO
SUERO SANGUINEO
NINGUN FARMACO
Los geles bidimensionales muestran que el fármaco suscita la producción de nuevas proteínas, unas inofensivas (en amarillo) y otras con potenciales efectos secundarios (en rojo)

suelven en agua, mientras que otras normalmente sólo actúan en medios lipídicos o tienen regiones que están imbricadas en membranas celulares rellenas de grasa.

Pero no termina ahí la complejidad. Aunque suele admitirse que el genoma contiene del orden de 40.000 genes, lo cierto es que una célula típica elabora cientos de miles de proteínas distintas. La cabal comprensión del proteoma exige aprender las características de todas esas proteínas. No basta con manejar los datos obtenidos del Proyecto Genoma Humano, que finalmente echan por tierra el viejo dogma de que un gen codifica una sola proteína; está claro que puede dar origen a una multitud de proteínas diferentes.

Pese a lo complicado del asunto, la investigación se muestra optimista. Aunque desconocemos del 30 al 50 por ciento de las proteínas humanas, contamos con medios para identificar con bastante rapidez las que componen nuestro organismo.

Proceso fabril de las proteínas

Cuando se quiere descubrir las proteínas presentes en células o tejidos seleccionados, suele recurrirse a dos técnicas: la electroforesis en gel bidimensional y la espectrometría de masas. En geles de dos dimensiones se añade una mezcla de proteínas al borde del gel fino que separa las proteínas en una dirección en razón de su tamaño y en la dirección perpendicular en razón de su carga electroquímica. Al venir la proteína caracterizada por su tamaño y su carga, a cada proteína corresponderá un punto discreto en el gel. Podemos recortar de los geles puntos individuales para identificar, mediante otras técnicas, las proteínas que contienen. Y comparando las configuraciones de puntos que presentan los geles obtenidos de dos tejidos diferentes pueden buscarse proteínas que fabrique un tejido, pero no el otro.

La espectrometría de masas emplea imanes o campos eléctricos para discernir las proteínas con arreglo a las masas de sus átomos constitutivos. Los resultados aparecen representados en crestas de un gráfico. Sin embargo, ni la técnica del gel bidimensional ni la espectrometría de masas son soluciones ideales. Los geles son especialmente difíciles de manejar y no pueden distinguir las proteínas muy grandes ni las muy pequeñas, ni las que sobresalen a través de membranas; la espectrometría de masas es muy cara y a veces falla en la detección de proteínas raras.

Pese a todo, varias empresas preparan versiones refinadas de estos métodos para utilizarlos en procedimientos industriales, que recuerdan las que hicieron posible el Proyecto Genoma Humano. La pieza fundamental del proyecto fue el ABI 3700, el secuenciador de ADN desarrollado por Applied Biosystems. En enero, presentó Applied Biosystems su analizador proteómico 4700, a la par que anunciaba un acuerdo con PerkinElmer y Millipore sobre la producción de un sistema automatizado para tratamiento y análisis de geles bidimensionales. Se espera que la automatización permita realizar en días lo que antes necesitaba meses o años. Pero queda por ver si estos nuevos sistemas van a ser estándares de la proteómica. La materia es demasiado vasta para que se imponga un solo sistema o método de trabajo.

Entretanto, las empresas Myriad Genetics, GeneProt, Large Scale Biology y MDS Proteomics se han incorporado a este campo con plantas proteómicas de diseño propio, algunas de las cuales utilizan técnicas robóticas tomadas de la industria de automoción. El año pasado Myriad anunció que se había aliado con Hitachi y Oracle en una operación de 210 millones de euros para descifrar en tres años el proteoma humano completo, programa que se ha iniciado oficialmente en enero de este año. Celera, por su parte, ha asignado cerca de 1140 millones de euros a sus trabajos en proteómica.

Los críticos de estos grandes proyectos aducen que no hay un proteoma humano único: como ejemplo, el páncreas produce un conjunto de proteínas muy diferente del que elabora el cerebro. Existen, además, numerosas variables (la simple ingesta reciente de un vaso de vino) capaces de afectar los tipos de proteínas que genera el organismo. Cada estado —salud más o menos buena, mayor o menor cantidad de fármaco— crea un proteoma diferente.

En resumen, la enumeración de las proteínas humanas lleva a extremos insospechados. Para comprender su actuación en el organismo y poder desarrollar fármacos útiles, es preciso conocer cómo varían las proporciones de proteínas de un tipo de célula a otro y en el interior de una misma célula. Necesitamos saber, asimismo, de qué manera colaboran las proteínas en las diversas actividades de una célula.

Escuchando en la red

La compañía de Moran se ha concentrado en esta última tarea: examinar cómo se engarzan entre sí las proteínas para formar cadenas de reacciones bioquímicas o construir máquinas moleculares como el huso, la que parte en dos la célula en el momento de la división celular. “Las proteínas se ensamblan en redes”, afirma Moran. “Si sólo pudiéramos hacer una pregunta sobre una proteína, sería con qué otras proteínas interacciona.”

En un estudio reciente, científicos de MDS Proteomics y la Universidad de Toronto —junto con los de un grupo independiente de Cellzome y del Laboratorio Europeo de Biología Molecular— presentaban una nueva estrategia para localizar cientos de interacciones proteínicas en la levadura. Su enfoque consiste en juntar a los centenares de genes de levadura escogidos unos fragmentos de ADN que codifiquen “etiquetas” adhesivas. De este modo pueden aislarse las proteínas elaboradas por los genes modificados, unidas a cualesquiera proteínas que se les hayan pegado, sin más que triturar la levadura y hacer pasar la lechada resultante por una columna de perlas microscópicas que sólo puedan unirse a las etiquetas adhesivas. Tras haber procesado los complejos de proteínas en un espectrómetro de masas y analizado los resultados, se descubrió que más del 90 por ciento de los complejos aislados contenían proteínas de fun-



2. LA ESTACION ROBOTICA de una planta proteómica aplica técnicas de las cadenas de montaje de automóviles. La que aquí se ilustra está configurada para automatizar tareas repetitivas, como poner en probeta y cambiar el medio de crecimiento, dentro del proceso de crecimiento de cultivos celulares, que es requisito previo para estudios de proteómica. Otros módulos de este tipo industrializan el aislamiento y la identificación de proteínas que servirán de muestras para ulterior estudio.

ción desconocida. Y más aún, hasta el 80 por ciento de las proteínas interaccionaban al menos con otra proteína, lo que muestra la complejidad de la red bioquímica intracelular.

MDS Proteomics proyecta ahora aplicar esta técnica al proteoma humano. Dado que el proteoma de la levadura se completó en unas pocas semanas, la compañía apuesta por conseguir de aquí a un año una instantánea inicial del proteoma de una célula humana. No está claro, sin embargo, qué tipo de célula humana van a estudiar ni en qué condiciones.

En los Estados Unidos el sector público presta también atención a la proteómica. Se ha concedido a Samir M. Hanash, de la Universidad de Michigan, la dirección de la Organización del Proteoma Humano (HUPO), que coordina los proyectos de proteoma en el sector público. (El Proyecto Genoma Humano coordinó a los laboratorios académicos que descifraban el genoma humano.) Uno de los primeros objetivos de la HUPO será determinar las proteínas presentes en el suero sanguíneo.

El Instituto Nacional del Cáncer (NCI) y la Agencia de Alimentación y Farmacia (FDA) trabajan en el desarrollo, por medios proteómicos, de tratamientos anticancerígenos mejor dirigidos y diagnósticos más certeros. En el programa, anunciado en julio de 2001, se analizarán células tumorales de distintos pacientes para obtener una lista de proteínas presentes en células cancerosas mas no en células sanas. Asimismo, buscarán "marcadores" de proteínas

UN DIRECTORIO DE LA PROTEOMICA



Aplica la proteómica a la comparación de tejido sano con tejido enfermo para encontrar proteínas asociadas a la patología que puedan ser alcanzadas con anticuerpos monoclonales, inmunoterapia celular o fármacos de molécula pequeña.



Fundada por científicos del Laboratorio Europeo de Biología Molecular. Caracteriza complejos de proteínas celulares y cartografía interacciones y trayectos proteínicos en condiciones experimentales variables.



Analiza bibliotecas de genes para identificar interacciones entre las proteínas que codifican y comprender mejor el comportamiento de los genes ante una enfermedad. Posee una patente esencial sobre el método de doble hibridación de la levadura para el trazado de redes de proteínas.



Identifica, caracteriza y sintetiza proteínas humanas escogidas para utilizarse en el descubrimiento y desarrollo de nuevas terapias.



Ha desarrollado técnicas industriales para identificar, seleccionar y validar fármacos deseados. Se propone construir una cadena de "biomarcadores" patológicos y de fármacos anticuerpos.



Está creando una familia de bases de datos del proteoma humano, muy completas e interconectadas, que incluyen marcadores proteínicos para el diagnóstico y seguimiento de enfermedades. Produce programas propios o en colaboración con otras firmas para el desarrollo de fármacos.



Identifica, selecciona y valida proteínas deseadas para terapéuticas tanto de anticuerpos como de molécula pequeña. Su foco de interés es el cáncer, especialmente los receptores y la señalización intracelular, así como las redes de mensajes en el interior de las células.



Determina la función de cada proteína. Especifica la formación de los complejos que constituyen máquinas enzimáticas y circuitos de señalización. Se vale de técnicas de doble hibridación de la levadura y de espectrometría de masas.



Utiliza técnicas de alto rendimiento para determinar las estructuras de efectores clave dentro de familias de proteínas. Emplea técnicas bioinformáticas para "acoplar" virtualmente los fármacos propuestos a los puntos de adhesión de los efectores.

Genera estructuras tridimensionales de la proteína y las utiliza para descubrir nuevos fármacos. Syrrx conjuga el uso de herramientas moleculares con la robótica para determinar estructuras proteínicas a escala industrial.

que se correlacionen con los cánceres más agresivos, con el refinamiento consiguiente de las pruebas diagnósticas.

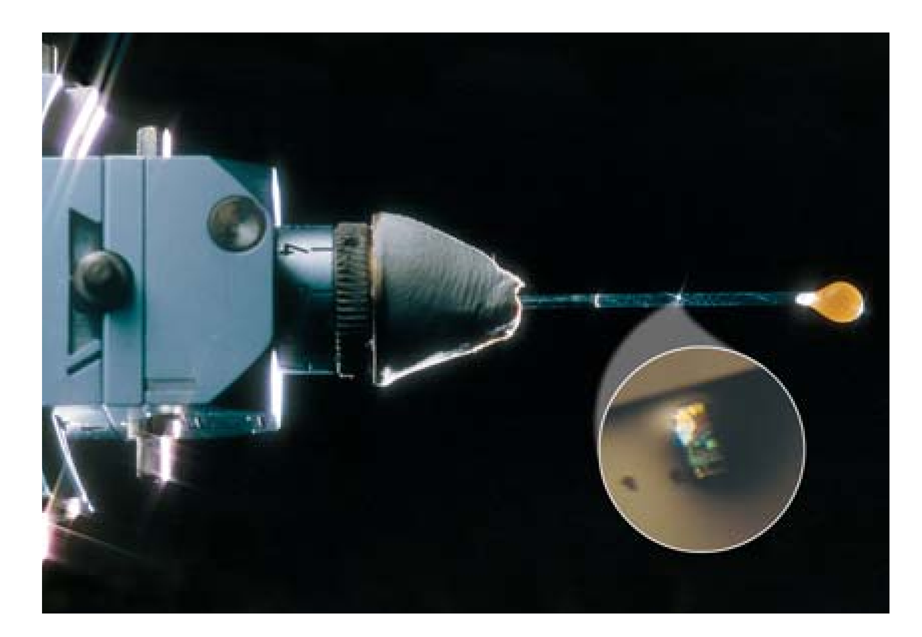
Junto con otros investigadores, Emanuel Petricoin, codirector del programa NCI/FDA, acaba de demostrar las interesantes perspectivas de la aplicación de la proteómica al diagnóstico de tumores. En un trabajo aparecido en febrero explicaba que podían compararse las configuraciones de proteínas presentes en el suero sanguíneo de pacientes afectadas o no por cáncer de ovario. Resultado de esta comparación fue la identificación correcta de las 50 mujeres que sufrían cáncer de ovario, sin dejar ni una; no tuvo más fallo que dar tres falsos positivos entre las mujeres que no sufrían cáncer.

La catalogación y la cartografía de las interacciones entre proteínas suponen las dos terceras partes de la proteómica; igual importancia reviste la determinación de las formas de las proteínas. La técnica clásica es la cristalografía por rayos X, en la cual se purifican las proteínas, se las hace crecer en cristales y se bombardean luego los cristales con rayos X. Analizando cómo rebotan los rayos X en los átomos componentes de una proteína, se infiere el ensamblaje de la misma y su estructura tridimensional.

Las formas que han de venir

La cristalografía de rayos X fue en un tiempo una industria muy restringida, que exigía el acceso al haz de rayos X de un sincrotrón. Estos enormes anillos, a veces de kilómetros de diámetro, se han venido utilizado históricamente para acelerar las partículas atómicas. En el curso de ese proceso se producen los rayos X. Pero hoy día los avances técnicos en el dominio de los láseres de rayos X han posibilitado la aparición de aparatos de sobremesa, idóneos para laboratorios.

Dos compañías —Syrrx y Structural GenomiX (SGX)— han llevado la cristalografía por rayos X al terreno industrial. A semejanza de las compañías que automatizaron el proceso de descubrimiento de



3. LA CRISTALOGRAFIA DE RAYOS X requiere el crecimiento de un cristal puro de la proteína investigada (*zona aumentada*). Un cristal de CD4, la proteína que actúa como pasarela para la infección de células del sistema inmunitario por el virus del sida, se mantiene aquí dentro de un minúsculo tubo sellado con una bola de cera. El tubo se bombardeará luego con rayos X, proporcionando un patrón cuya interpretación servirá para determinar la estructura tridimensional de una molécula de proteína.

las proteínas, Syrrx se ha inspirado en técnicas de la automoción. Hasta el punto de haber traído a su planta de San Diego consultores de General Motors para automatizar su planta de 7800 metros cuadrados, en la que todo —desde la purificación de la proteína hasta la cristalización— se realiza sobre una cadena de montaje. Además de sus propios láseres de rayos X, la compañía dispone de un trayecto de haz reservado en la Fuente Luminosa Avanzada del Laboratorio Lawrence en Berkeley. Structural GenomiX tiene un acuerdo semejante con la Fuente Fotónica Avanzada del Laboratorio Nacional Argonne, donde ha construido un trayecto de haz.

Esta información estructural podría ser objeto de protección. La compañía inglesa Oxford GlycoSciences aduce que puede reclamar patente sobre una porción notable del genoma y el proteoma humano utilizando datos proteómicos. En diciembre pasado la compañía presentó solicitudes de patente para 4000 proteínas humanas, lo que podría trastornar la definición de propiedad intelectual en biotécnica. En otros tiempos, las empresas buscaban patentar secuencias de ADN y la única proteína que supuestamente iban éstas a codificar. Pero como un mismo gen puede elaborar toda una serie de proteínas, tal vez tendrían más valor las reivindicaciones basadas en las propias proteínas y ofrecerían además un camino para esquivar las patentes de secuencias de ADN en poder de la competencia. Si esto fuera así, los tribunales serían un terreno de liza más en el que los genes tendrán que dejar paso a las proteínas.

Bibliografía complementaria

HIGH-SPEED BIOLOGISTS SEARCH FOR GOLD IN PROTEINS. Robert F. Service en *Science*, vol. 294, págs. 2074-2077; 7 de diciembre, 2001.

SEPARATION ANXIETY: WHY PROTEOMICS CAN' LET GO OF 2D GELS. Aaron J. Sender en *Genome Technology,* n.º 16, págs. 34-39; diciembre de 2001.

De los núcleos atómicos a las proteínas

Un modelo basado en las interacciones entre los nucleones permite acotar las fases a través de las cuales una cadena lineal de aminoácidos se va plegando hasta adoptar la estructura tridimensional característica de las proteínas

Ricardo A. Broglia

En muchos sucesos de la vida cotidiana, la regularidad con que se presentan los fenómenos es para nosotros tranquilizadora. Al despertarnos por la mañana no esperamos grandes sorpresas. El mundo funcionará en sus aspectos fundamentales como el día anterior. Las cosas no cambiarán por mucho que nos movamos de aquí a allá: volverá a estar llena la barra del bar donde tomamos el primer café y la pelota de tenis, si ése es nuestro deporte, seguirá la misma trayectoria independientemente de la dirección en que se lance, a igualdad de condiciones iniciales. Estas dos afirmaciones tan banales reflejan un hecho menos trivial: el espacio físico tiene un elevado grado de simetría, puesto que es homogéneo (invariante respecto a las traslaciones) e isótropo (invariante respecto a las rotaciones). En otras palabras, las leyes que gobiernan los fenómenos físicos no dependen del lugar ni de la dirección a la que se refieren. Todo ello también es aplicable a las partículas (electrones, átomos, fotones, etcétera).

A la homogeneidad y la isotropía del espacio físico se debe que los electrones en órbita alrededor del núcleo atómico se muevan de tal forma, que el producto de su momento por su distancia al centro del átomo, momento angular, sea proporcional a un número natural (0, 1, 2...). En el lenguaje de la mecánica cuántica, conjunto de leyes que gobiernan el comportamiento de lo infinitamente pequeño, se dice que los electrones tienen en el átomo un momento angular definido, cuantizado. Verdad que se predica también del movimiento de los nucleones (protones y neutrones) en el núcleo atómico, paradigma de los sistemas finitos de muchos cuerpos. De hecho, en este sistema la acción de todos los nucleones sobre uno de ellos forma una suerte de "jaula" esférica (campo medio), tal como quiere la isotropía del espacio, donde los nucleones describen órbitas con momento angular 0, 1, 2...

Pero de vez en cuando, a causa del efecto de la polarización de los nucleones que se mueven con trayectorias con un momento angular elevado (orbitales calientes), el campo medio se deforma, por un fenómeno que se puede provechosamente asimilar al movimiento de las mareas por efecto del campo gravitatorio de la Luna. Esta deformación define una dirección privilegiada en el espacio. De acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica no puede tolerarse semejante rotura espontánea de la simetría: el sistema empieza a girar en su conjunto, haciendo que el sistema sea isótropo. En la frecuencia más baja permitida, promediando entre las diversas orientaciones, se produce un sistema dinámico de simetría esférica y dotado de un momento angular nulo que constituye el estado fundamental, o de energía mínima. Junto con los estados de momento angular más elevado, correspondientes a frecuencias de rotación cuantizadas, el estado fundamental forma una banda rotacional. La energía de los miembros de la banda rotacional es, en promedio, mucho más baja que la asociada a excitaciones del sistema, donde los movimientos de los nucleones en los orbitales calientes se modifica para dar lugar a excitaciones intrínsecas del sistema. El espectro de estas excitaciones resulta un tanto caótico, mientras que el asociado a las bandas rotacionales es muy ordenado.

Como la transición experimentada por el sistema finito (núcleo) entre la fase esférica y la deformada está esencialmente inducida por muy pocos orbitales calientes, la estabilidad del estado fundamental y las propiedades de las bandas rotacionales (estados colectivos) se hallan, en gran medida, controladas por



1. LA SOMATOTROPINA, la hormona del crecimiento, es una proteína producida en el lóbulo anterior de la hipófisis. Se trata de una molécula formada por 191 aminoácidos con un peso molecular de 22.005 unidades atómicas. Se representa aquí su forma nativa, como molécula de estructura tridimensional complicada. El problema de cómo las proteínas alcanzan su plegamiento tridimensional a partir de una cadena lineal de aminoácidos está aún abierto, pero presenta interesantes analogías con los modelos que describen los núcleos atómicos.

estos orbitales. Una descripción cuantitativamente precisa de la estructura nuclear y de sus correspondientes transiciones de fase demanda un cálculo *ab initio* de las contribuciones de los orbitales calientes a las correspondientes magnitudes físicas, mientras que la contribución de otros orbitales puede parametrizarse de forma aproximada.

La existencia de un campo medio que controla el movimiento independiente de las partículas y que, al deformarse, origina familias de estados rotacionales relacionados, con la misma estructura espacial estabilizada por los orbitales calientes del sistema, constituye la síntesis de la investigación sobre sistemas cuánticos finitos de muchos cuerpos en general y sobre el núcleo atómico en particular.

Plegamiento de proteínas

Podemos recurrir a estos resultados para resolver problemas importantes en otros campos del conocimiento, la biología sin ir más lejos. La secuenciación del genoma humano, es decir, el conocimiento del orden sucesivo de centenares de miles de bases en la molécula de ADN, encontrará significado cuando se puedan convertir las secuencias génicas en secuencias y estructuras de proteínas. Esto permitirá desentrañar el origen del desarrollo epigenético autónomo del organismo y el relativo a la formación en la fase embrionaria de las partes que no están presentes como tales en el huevo.

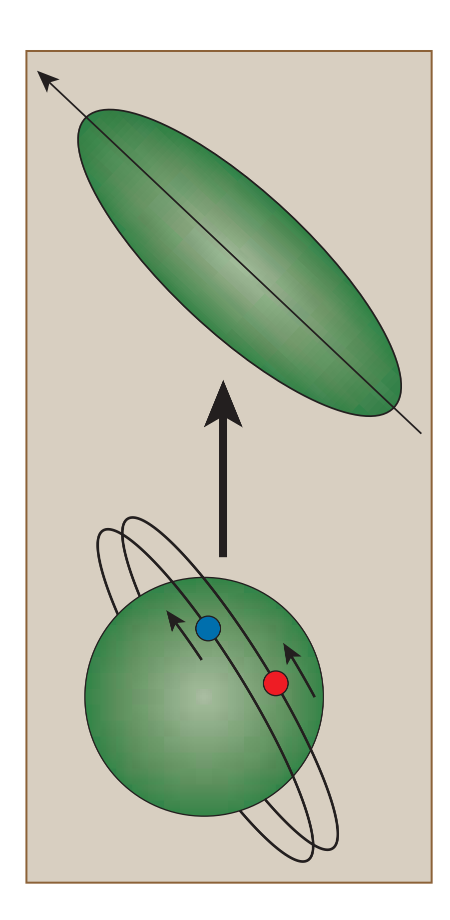
En este desarrollo se pueden acotar fases y niveles sucesivos: el plegamiento de las secuencias polipeptídicas para formar estructuras globulares dotadas de propiedades asociativas y esteroespecíficas; las interacciones asociativas entre proteínas o entre proteínas y otros constituyentes para la formación de orgánulos celulares; la interacción entre células para constituir tejidos y órganos; la coordinación y la diferenciación, en todas estas fases, de las actividades químicas mediante interacciones de tipo alostérico, en las que una enzima cambia de conformación en respuesta a la interacción con una pequeña molécula (efector). El principio de todas estas estructuras y las prestaciones teleonómicas de los seres vivos a través de las cuales se realiza el finalismo biológico fruto de la selección natural, se halla, por tanto, escondido en las secuencias de los polipéptidos.

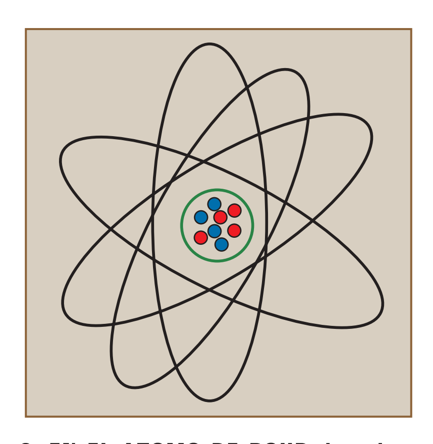
En un sentido muy concreto, el secreto de la vida, o sea, la peculiaridad de las moléculas biológicas, si es que existe, debe buscarse en este nivel de organización química, en particular en la relación existente entre la estructura lineal unidimensional desnaturalizada (D) de la proteína y la estructura nativa tridimensional (N) biológicamente activa, en la que la secuencia lineal, una vez fabricada en el ribosoma, se pliega en un tiempo comprendido entre el microsegundo y el segundo.

El conocimiento de los mecanismos en que se basa el plegamiento permitiría predecir la estructura nativa de una proteína a partir de la secuencia de sus veinte tipos distintos de aminoácidos. Para nuestro infortunio

Resumen/Modelos

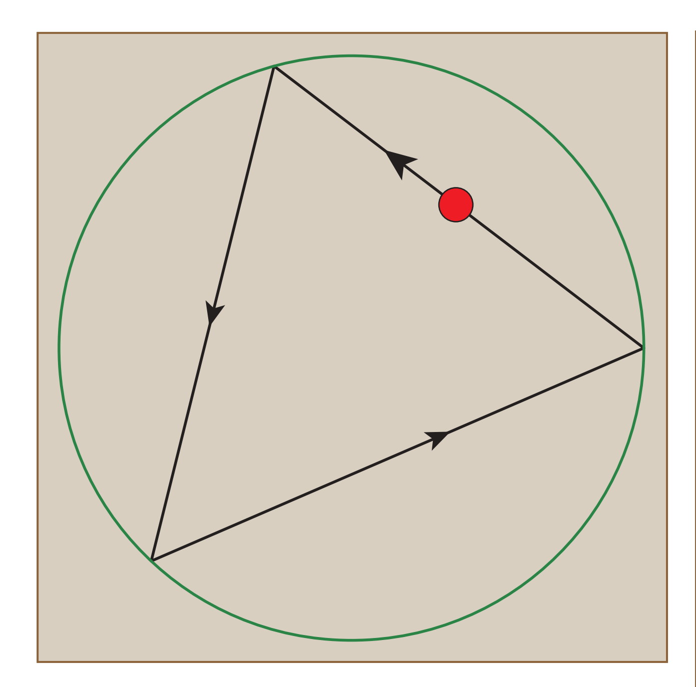
- Ciertas características de los modelos utilizados para describir la estructura de los núcleos atómicos a partir de las interacciones entre nucleones nos sirven para resolver problemas de gran alcance en otros campos de la investigación, en particular, la biología.
- La peculiaridad de las proteínas reside en la relación unívoca entre una estructura lineal unidimensional y la estructura nativa tridimensional, biológicamente activa, en la que la secuencia lineal producida por los ribosomas se repliega en una fracción de tiempo que dura entre el microsegundo y el segundo.
- En un modelo mínimo de las proteínas, la secuencia lineal se organiza formando estructuras locales elementales estables. Sucesivamente se forma un núcleo de plegamiento postcrítico y, por último, la estructura tridimensional estable, según una configuración en que la energía de la molécula está por debajo de un determinado valor crítico.

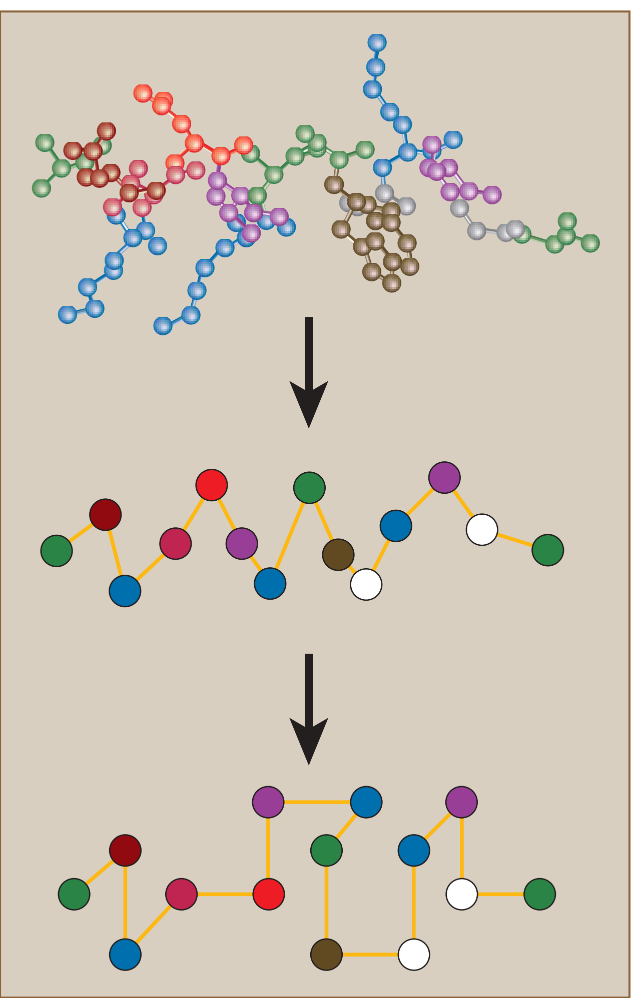




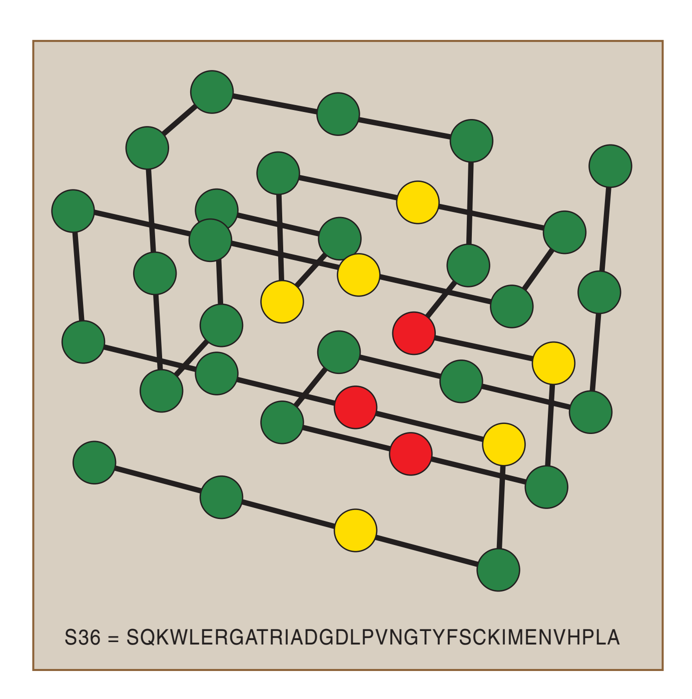
2. EN EL ATOMO DE BOHR, los electrones se mueven en órbitas (*en negro*) alrededor del núcleo atómico (*en verde*), formado por protones (*en rojo*) y neutrones (*en azul*). Se trata de una representación esquemática que no respeta la escala.

3. EL EFECTO DE POLARIZACION ejercido por dos nucleones sobre un núcleo esférico crea un núcleo deformado y, por ende, una estructura orientada según una dirección privilegiada.





4. REPRESENTACION SEMICLASICA del movimiento de un protón (*arriba*) en su trayectoria (*en negro*) dentro del núcleo (*en verde*). El proceso de simplificación (*a la derecha*) lleva de la proteína verdadera (*arriba*) —en la que se consideran en detalle todos los átomos de cada aminoácido— a una representación en la que cada uno de los 20 aminoácidos viene representado por un círculo (*en el centro*), hasta un modelo mínimo de una proteína en el que cada círculo sólo puede desplazarse sobre los vértices de un retículo. La estructura nativa de una proteína de 36 aminoácidos (*abajo*) se presenta con una secuencia (*al pie*) de una energía significativamente pequeña en tal configuración (S36) y que, por tanto, se repliega en ésta en poco tiempo. También se señalan los puntos calientes (*en rojo*), templados (*en amarillo*) y fríos (*en verde*).

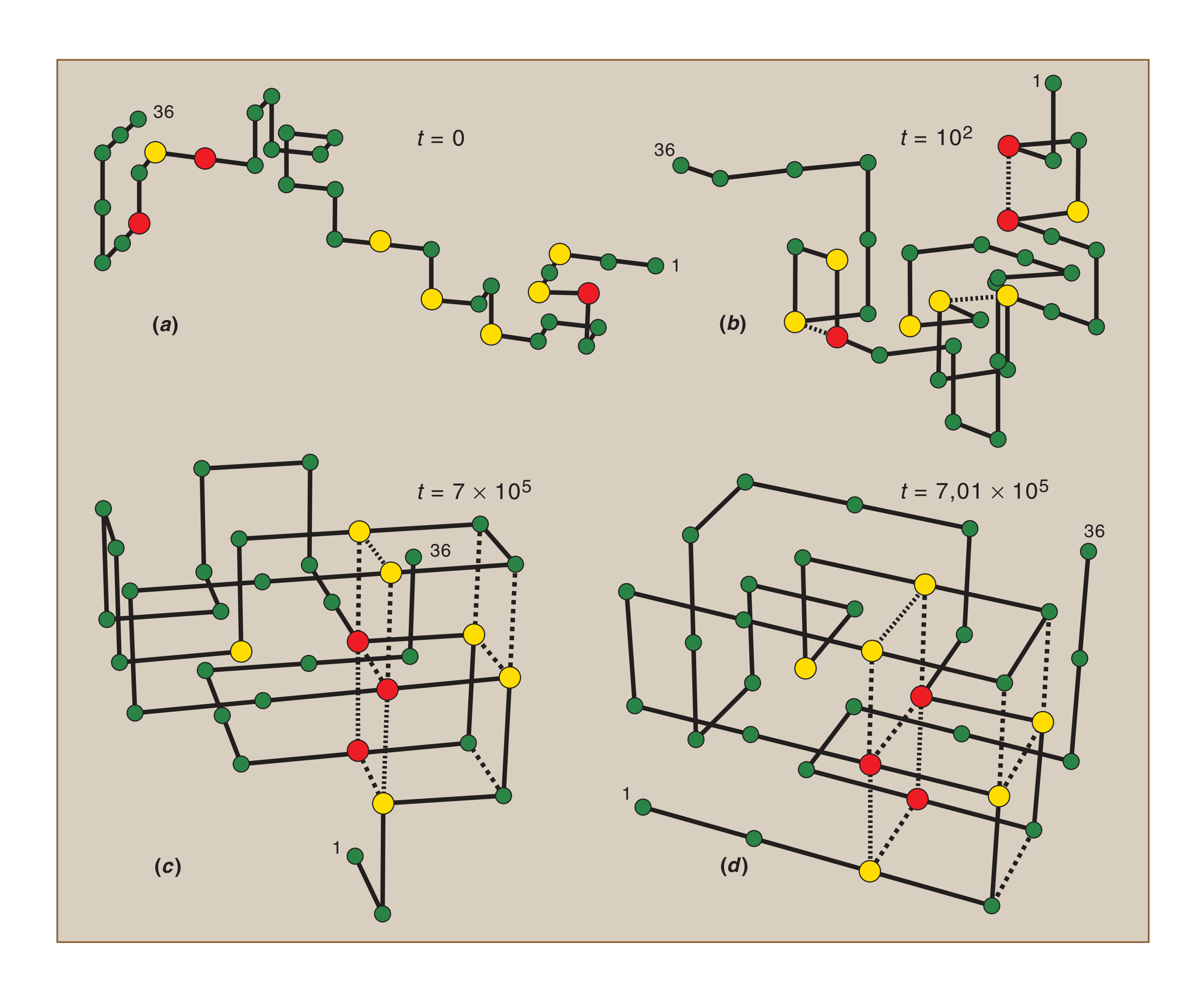


no se ha hallado solución todavía al problema del plegamiento de las proteínas. Pero, aunque sólo en un modelo mínimo de proteínas, sí se ha encontrado solución al denominado problema inverso del plegamiento: dada una estructura nativa, podemos averiguar la secuencia lineal de los aminoácidos que la componen.

En este modelo, cada aminoácido está representado por una esfera limitada en su movimiento a uno de los vértices de un retículo, en interacción con los aminoácidos más próximos. La solución al problema inverso del plegamiento es fácil: la secuencia de aminoácidos que se repliega en una estructura nativa dada es la secuencia que en esta estructura alcanza el valor mínimo de energía. Esta condición se puede formular de forma menos restrictiva, precisando que la secuencia encuentre en la estructura nativa un valor de energía suficientemente pequeño, esto es, menor que la energía mínima E_c asociada al conjunto de conformaciones tridimensionales compactas que sean estructuralmente distintas de la nativa.

Lecciones del problema inverso

El principal resultado experimental a propósito del plegamiento de las proteínas monoglobulares radica en el carácter súbito, del "todo o nada", de la



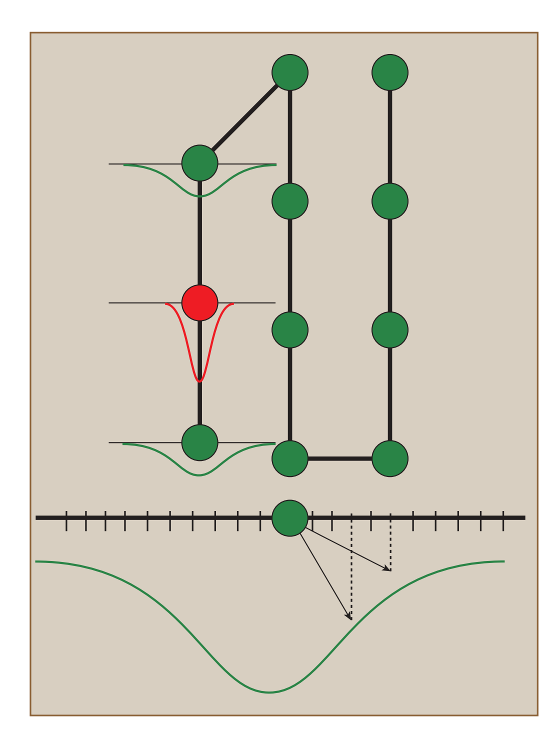
5. EVOLUCION TEMPORAL DE LA SECUENCIA S36. Partiendo de una conformación desnaturalizada, en el instante *t* = 0 (*a*), y tras muy pocos intentos (100 de los 701.000 necesarios para que la secuencia se pliegue en la estructura nativa, en (*d*), se forman tres estructuras locales elementales (*b*) que ya serán esencialmente estables por las interacciones entre los aminoácidos calientes o templados (*línea punteada fina*). Estas estructuras locales elementales forman, después de una serie de ensayos, el núcleo de plegamiento postcrítico (*c*), estabilizado por la interacción entre estructuras (*línea punteada gruesa*). Prácticamente de inmediato, esto es, después de otros 1000 intentos, los restantes aminoácidos ocupan su lugar en la estructura nativa. La proteína completa así el proceso de plegamiento.

transición entre el estado desnaturalizado y el nativo, fenómeno análogo al observado en las transiciones de fase de diversos sistemas físicos. En el proceso de plegamiento este carácter parece sorprendente, por cuanto las proteínas son sistemas muy poco homogéneos, estructuralmente más asimilables a un sólido desordenado que a un cristal. Erwin Schrödinger subrayaba esta última circunstancia en su libro *¿Qué es la vida?* publicado en 1944. Adopta allí la expresión cristal aperiódico para describir una biomolécula. La inhomogeneidad, una propiedad esencial de los sistemas finitos, se halla presente también en el núcleo atómico, donde los orbitales se caracterizan por valores de momento angular muy distintos entre sí.

Consecuentemente, para entender las propiedades de las proteínas diseñadas según el modelo del plegamiento inverso, hay que empezar por identificar los sitios calientes. A este fin, se introducen mutaciones en cada sitio, sustituyendo el aminoácido de la secuencia de baja energía por uno de los otros 19 aminoácidos y se estudia el comportamiento dinámico de la proteína. Si la mutación impide la transición del estado desnaturalizado al nativo, un fenómeno que se ha observado en alrededor del ocho por ciento de los casos, la mutación se ha producido en un sitio caliente, en general bien protegido y ocupado por aminoácidos apolares (hidrófobos). Por contra, si la secuencia resultante de la inserción de una mutación se pliega sobre la propia estructura nativa empleada para diseñar la proteína, algo que sucede en un 92 por ciento de los casos, la mutación (denominada neutra) ha

ocurrido en un sitio "templado" o "frío".

Distintas secuencias, por tanto, pueden corresponder a la misma estructura nativa. En particular, mutaciones únicas y múltiples de composición constante (intercambio de aminoácidos) en la secuencia S36 dan lugar a 10^{30} secuencias que se repliegan en la misma estructura nativa de S36; esta familia de secuencias es el equivalente, en el núcleo atómico, al conjunto de estados que forman una banda rotacional. Aquí, la violación de la simetría es la del contenido de aminoácidos en cada sitio de la estructura nativa. En otras palabras, un núcleo atómico encuentra un estado de energía mínima colocando sus nucleones en orbitales que corresponden no a un momento angular definido, sino a una combinación lineal de momentos angulares (rotura espontánea de la simetría de rotación). De la misma manera, una proteína disminuye su energía al instalar en cada sitio de su estructura nativa, no un aminoácido definido, sino una combinación lineal de aminoácidos (rotura espontánea de la conservación del contenido de los aminoácidos). La recuperación de estas simetrías, como exige la mecánica cuántica, engendra bandas rotacionales y familias de proteínas con la misma estructura intrínseca y nativa, respectivamente.



6. ROTURA ESPONTANEA DE LA SIMETRIA de una proteína, esto es, del contenido de aminoácidos de cada sitio. La distribución gaussiana en cada sitio representa las distintas proyecciones (20) del contenido de aminoácidos, una magnitud que puede considerarse un "cuasi-espín", en analogía con el espín de los nucleones. El sistema alinea estos cuasi-espines, con la minimización consiguiente de la energía del sistema y la rotura espontánea de la simetría.

La estabilidad de la proteína, en definitiva, viene determinada por los aminoácidos presentes en los sitios calientes, comunes a las 10^{30} secuencias (aminoácidos conservados). Pero no sólo por ellos: los sitios calientes determinan también la jerarquía de los contactos que se establecen en el proceso de plegamiento de la proteína. De hecho, siguiendo la evolución de una secuencia de aminoácidos diseñada, de la configuración lineal desnaturalizada a la estructura nativa, se observa una sucesión de pasos perfectamente determinada. En primer lugar se asiste a la formación, casi instantánea, de estructuras locales elementales, estabilizadas por la interacción entre aminoácidos calientes. A continuación, se verifica la formación del núcleo de plegamiento postcrítico, resultante del engarce de las estructuras locales, que contiene el mínimo número de contactos nativos que aseguran el plegamiento. Por último, en un lapso brevísimo tras la formación del núcleo de plegamiento, aparece la relajación de los aminoácidos restantes en la estructura nativa que da lugar a un solo sistema de energía menor que E_c.

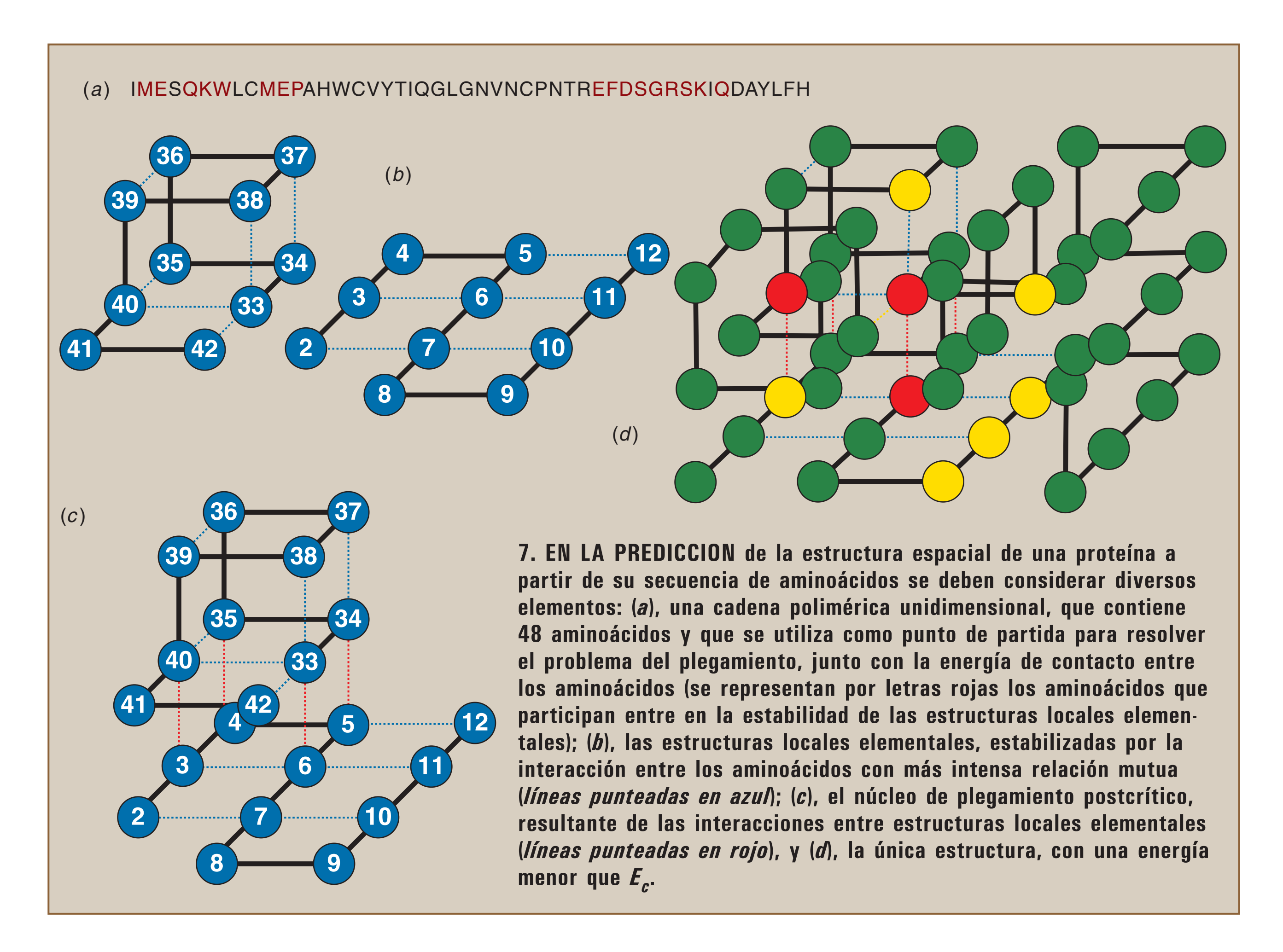
Un mecano molecular

En otras palabras, el plegamiento de las proteínas no está controlado por cada aminoácido, sino por las estructuras locales elementales que funcionan como diminutas piezas de un mecano molecular. Si se combinan de la forma correcta, originan el núcleo de plegamiento y, por tanto, el mínimo número de contactos nativos que aseguran el plegamiento llevando el sistema del estado desnaturalizado a una estructura que se encuentra más allá de la barrera energética que lo separa del estado nativo. Se trata de una región donde, desde el punto de vista energético, todos los pasos posteriores son cuesta abajo. La analogía utilizada explica también el mecanismo de plegamiento de los dímeros e incluso la agregación de proteínas en placas amieloides, el fenómeno observado en los que padecen la enfermedad de Alzheimer o la de Creutzfeldt-Jakob. En este caso y siguiendo con la analogía, las piezas de una proteína se unen fuertemente a las de otra y dan lugar a un sistema tan estable, que no puede plegarse y pone las bases para la formación de un depósito amieloide.

El mecanismo de plegamiento de las proteínas esbozado trasciende incluso viejas cuestiones relacionadas con las proteínas. De entrada, la paradoja de Levinthal, según la cual el número de las posibles conformaciones de una cadena polimérica de 100 aminoácidos supera la edad del universo expresada en segundos. Parece evidente que, en la naturaleza, para alcanzar su estructura nativa una cadena polipeptídica no pasa por todas las posibilidades de configuración: teniendo en cuenta un lapso de tiempo mínimo para pasar de una a otra, el tiempo empleado sería mucho mayor del que realmente se observa. De la misma manera parecen superfluas las consideraciones sobre la importancia relativa de los contactos nativos locales y no locales; sí reviste mayor interés el *criterio de re-*

El autor

RICARDO A. BROGLIA es titular de la cátedra de teoría de la estructura nuclear de la Universidad de Milán y profesor extraordinario de física teórica del Instituto Niels Bohr de Copenhague.



7. EN LA PREDICCION de la estructura espacial de una proteína a partir de su secuencia de aminoácidos se deben considerar diversos elementos: (*a*), una cadena polimérica unidimensional, que contiene 48 aminoácidos y que se utiliza como punto de partida para resolver el problema del plegamiento, junto con la energía de contacto entre los aminoácidos (se representan por letras rojas los aminoácidos que participan entre en la estabilidad de las estructuras locales elementales); (*b*), las estructuras locales elementales, estabilizadas por la interacción entre los aminoácidos con más intensa relación mutua (*líneas punteadas en azul*); (*c*), el núcleo de plegamiento postcrítico, resultante de las interacciones entre estructuras locales elementales (*líneas punteadas en rojo*), y (*d*), la única estructura, con una energía menor que E_c.

plegabilidad (muchas secuencias que se repliegan en la misma estructura tridimensional nativa en un tiempo corto) y el *de diseño* (muchas secuencias que tienen como estado más bajo de energía aquel en el que la secuencia se repliega en la estructura nativa).

La simplicidad y la economía con las que el modelo de los sitios calientes y de las estructuras locales explica el plegamiento de las proteínas han permitido desarrollar un protocolo para resolver el problema del plegamiento en un retículo. Para su aplicación es preciso conocer, además de la secuencia de aminoácidos, su interacción. El protocolo se estructura en tres puntos: determinación de las posibles estructuras locales elementales con un número limitado de aminoácidos (de un 10 a un 20 por ciento respecto al número de monómeros de la proteína); determinación de los posibles núcleos de plegamiento con energía de unión elevada juntando dos o más estructuras locales elementales, y relajamiento de los restantes aminoácidos. Entre las estructuras resultantes la única con energía menor que E_c es la estructura nativa.

La aplicación de esta estrategia a todos los ejemplos de cadenas de aminoácidos proyectados ha producido, sin excepción, el resultado correcto. Cabe señalar que ésta es la primera solución del problema del plegamiento de las proteínas en un retículo. Aún más, el protocolo empleado está particularmente adaptado para su generalización al caso de las proteínas reales. Para ello es necesario calcular *ab initio* la interacción entre los escasos aminoácidos calientes en presencia del solvente (agua). El empeño no es fácil, pero se ha identificado una vía de llevarlo a buen puerto gracias a la experiencia acumulada en el cálculo de los principios primeros de las propiedades de las agregaciones moleculares y en particular de los fullerenos.

Bibliografía complementaria

WHAT IS LIFE? Erwin Schrödinger. Cambridge University Press; Cambridge, 1944.

NUCLEAR STRUCTURE, vol II. A. Bohr, B. R. Mottelson. Benjamin, Nueva York, 1975.

STRUCTURE AND MECHANISM IN PROTEIN SCIENCE. A. Fersht. W. H. And Co., Nueva York, 1999.

MECHANISM OF FOLDING AND AGGREGATION OF PROTEINS. R. A. Broglia y G. Tiana, en *Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi*. IOS Press; Amsterdam, 2001.

PROTEIN FOLDING: MATCHING THEORY AND EXPERIMENT. L. Mirny, E. I. Shakhnovich, en *Proceedings of the International School of Physics Enrico Fermi*. IOS Press; Amsterdam, 2001.



1. LA DESTRUCCION DE UNO DE LOS SEXOS: la bacteria *Wolbachia* elimina a las mariposas macho de *Acraea encedon* porque sólo las hembras pueden hospedar al parásito y transferir su puesta a la siguiente generación.

Parasitismo y evolución

La bacteria parásita *Wolbachia* dirige la vida sexual de sus hospedadores; puede que contribuya con ellos a originar nuevas especies

Laurence D. Hurst y James P. Randerson

"No muerdas la mano que te da de comer." El viejo refrán resume cómo se supone que los parásitos deben portarse con sus víctimas. A un parásito que sólo puede diseminarse cuando su hospedador se reproduce no le interesa ser muy dañino: si perjudica demasiado a su benefactor involuntario, sus propias posibilidades de procrearse menguarán. Contrasta con las tácticas de los patógenos que tienen un período corto de infección, como el virus de la gripe. El virus no tiene un interés a largo plazo en el bienestar del portador, de manera que opta por una estrategia de "transmisión rápida" sin tomar en cuenta los perjuicios para el que le hospeda.

La bacteria *Wolbachia* (emparentada a la bacteria del intestino *Escherichia coli*), muy difundida, es un inquilino con intereses a largo plazo en su hospedador invertebrado. Vive dentro de las células y se transmite a la generación siguiente invadiendo los huevos del hospedador. Sin embargo, pese al viejo refrán, actúa de varias y radicales maneras contra los que le albergan: mata a la descendencia masculina, convierte a los machos en hembras y vuelve infértiles algunos apareamientos de los hospedadores. Si la reproducción de *Wolbachia* está tan ligada a la conservación de su despensa, ¿por qué crea tanta destrucción en ella?

En pocas palabras: la bacteria no se transporta en el esperma. Al propagarse sólo a través del huevo, los intereses reproductivos del parásito se centran en las hembras hospedadoras. Los machos, que no la transmiten, vienen a ser para la bacteria prisiones evolutivas.

En el transcurso del tiempo, empero, la selección natural darwiniana ha sido capaz de liberar al parásito de su encarcelamiento en los hospedadores machos. De callejón evolutivo sin salida, el problema de la no transmisión pasa a ser una oportunidad. No debe de haber sido secundario el papel que *Wolbachia* ha representado en este drama evolutivo; sus manipulaciones pueden ejercer efectos profundos a largo plazo en las víctimas. Al perjudicar la reproducción del hospedador, *Wolbachia* quizá esté sentando las bases para el desarrollo de nuevas especies.

Wolbachia abunda mucho y muestra unos gustos muy amplios en la selección de las especies de insectos e invertebrados portadores. Cuando John H. Werren y sus colaboradores de la Universidad de Rochester analizaron insectos neotropicales en busca de la presencia de *Wolbachia*, encontraron que el 17 % de 154 especies albergaba la bacteria.

No obstante, puede que la verdadera frecuencia de la infección sea superior. Greg Hurst y su equipo del Colegio Universitario de Londres y de la Universidad de Cambridge detectaron varias especies de *Wolbachia,* bien conocidas ya, en alrededor de una décima parte de los individuos de una población hospedadora. Si se toman como muestra sólo unos pocos individuos de una determinada especie, tal y como hizo el grupo de Rochester, es probable que parezca que

muchas especies infectadas no lo estén. Además, Marjorie Hoy y Jay Jeyaprakash, de la Universidad de Florida, han determinado que la técnica empleada en el estudio de Rochester indica con frecuencia de manera errónea una ausencia de parasitación. Con un método de mayor fiabilidad, los investigadores de Florida descubrieron que más de las tres cuartas partes de las especies que habían analizado estaban infectadas con la bacteria.

El parásito no se encuentra únicamente en insectos; aparece también en crustáceos (cochinillas y gambas de agua dulce sobre todo), ácaros y gusanos nemátodos. Hasta ahora no ha sido detectado en animales vertebrados. Calculamos que más de 20 millones de especies albergan a *Wolbachia*; hasta ahora se habría estudiado sólo la punta de un enorme iceberg.

Machos exigentes

Uno de los modos empleados por *Wolbachia* para afectar profundamente a sus víctimas consiste en desequilibrar las proporciones entre los dos sexos, por lo normal igualadas en las poblaciones hospedadoras. Por ejemplo, los machos son rarísimos en algunos grupos de la mariposa africana *Acraea encedon* y de la extendida cochinilla *Armadillidium vulgare*.

En la mariposa, causa este fenómeno la ubicuidad de una cepa asesina de *Wolbachia* (más del 90 % de hembras de *A. encedon* llevan el parásito). La bacteria mata, cabe presumir, a los machos para beneficiar a sus congéneres que infectan a las hermanas de los machos asesinados. Este acto de suicidio individual tiene sentido porque una bacteria *Wolbachia* encerrada en un macho hospedador es, en realidad, "un muerto en vida". El esperma no transporta la bacteria; por tanto, ésta no tiene posibilidad alguna de llegar a otro hospedador. No tiene nada que perder. Además, sus afines en las hermanas de los machos muertos se benefician de este comportamiento, ya que la muerte les sobreviene a los machos antes de que hayan eclosionado. En consecuencia, un banquete de descendencia masculina sin eclosionar está listo para que lo devore el resto de la puesta, en cuanto emerja. Se piensa que este canibalismo, este devorar a sus hermanos, debe de proporcionar a las hembras parasitadas una importante ventaja sobre los competidores.

No se ha observado todavía esta ventaja adaptativa en las orugas de *A. encedon*, pero sí en *Adalia bipunctata*, una mariquita. Para sus larvas, el período entre la eclosión y encontrar el primer áfido con que alimentarse es un tiempo de vulnerabilidad. El festín que les proporcionan los hermanos fallecidos constituye, pues, un espléndido regalo para ellas y, por consiguiente, para las *Wolbachia* que transportan.

Wolbachia convierte en hembras a los machos en ciernes de *Armadillidium*. Al feminizar a los machos, el parásito transforma un hospedador que no transmite en otro que pasará la infección a su descendencia.

Tanto en la mariposa como en la cochinilla, la bacteria sesga los porcentajes de los sexos de las poblaciones de manera rotunda hacia las hembras. Los machos se convierten así en una mercancía valiosa. Esta escasez invierte los papeles normales de cada género, ya que las hembras son las solicitadas en las poblaciones con el porcentaje equilibrado. Su contribución a las crías, en forma de huevos grandes y nutritivos, es mucho mayor que la de los machos, cuya inversión en barato esperma es menor. Al ser las donantes principales de las crías, las hembras se muestran más exigentes en su selección de apareamientos y aceptan sólo a los machos mejor preparados.

Sin embargo, el proceso de selección se invierte en *Acraea* y *Armadillidium*, porque resulta muy difícil encontrar un macho. Por los trabajos de Francis M. Jiggins y sus compañeros de la Universidad de Cambridge sabemos que en las poblaciones de la mariposa *A. encedon* afectadas por el parásito está cambiado el



2. CAMBIOS SEXUALES COACTIVOS y, quizás, especiaciones forzadas pueden ser obra de la bacteria *Wolbachia*. Este minúsculo parásito transforma unas cochinillas (*arriba*) que deberían ser machos en hembras porque sólo se reproduce por medio de los huevos de las hembras de la cochinilla. La división evolutiva entre dos especies de avispas *Nasonia* (*un espécimen a la derecha*) parece haber sido causada por *Wolbachia*.

Los autores

LAURENCE D. HURST y JAMES P. RANDERSON han estudiado a los parásitos *Wolbachia* en la Universidad de Bath, en Inglaterra, donde Randerson estudió genética de poblaciones bajo la dirección de Hurst.

sistema de selección de machos. En vez de distribuirse por todo el hábitat, las hembras forman agregaciones densas en pequeñas parcelas herbáceas. En uno de esos agrupamientos, se vio a 350 mariposas apiñadas en un área de 200 metros cuadrados. Cuando el porcentaje de sexos de una especie es el corriente, como pasa con la perdiz sagaz, son los machos los que se congregan en *leks*; las hembras acuden a exhibirse.

¿Serán *leks* las agregaciones de *Acraea,* donde los papeles están cambiados y a los que acuden los machos para seleccionar la pareja? Carecemos de una respuesta tajante. Al comprobar que es más probable que las hembras vírgenes vivan en esos lugares que las fecundadas, Jiggins ha demostrado que las hembras se agrupan para encontrar con quién aparearse. Pero queda por comprobar si son los machos los que seleccionan.

Jiggins encontró en un principio que era más probable que las hembras ya apareadas estuviesen libres de la infección que las vírgenes; parecía deducirse de ello que los machos seleccionaban como pareja hembras no infectadas. Por desgracia, el propio Jiggins y Randerson (uno de los autores) no lograron repetir este resultado, de modo que la cuestión permanece abierta.

En el caso de la cochinilla, Thierry Rigaud y sus colaboradores de la Universidad de Poitiers han mostrado que los machos prefieren no aparearse con machos feminizados. Además, aunque se apareen con transexuales, les proporcionan poco esperma.

En nuestro propio trabajo hemos modelado con técnicas matemáticas la evolución de la elección de pareja en esas situaciones. A tenor de los resultados, la selección natural altera el proceso cuando una población hospedadora sufre una infección que distorsiona el porcentaje de los géneros. ¿Qué le sucede al parásito cuando las hembras infectadas no encuentran macho? Los modelos teóricos establecen que, cuando los machos son capaces de distinguir entre las hembras que están infectadas y las que no, se excluye a la bacteria de la población; pero basta con que los machos se equivoquen de vez en cuando y apareen con hembras parasitadas para que *Wolbachia* no desaparezca del grupo.

Cambios de sexo de los hospedadores

Es muy posible que la selección por el macho en el apareamiento sea una de las reacciones a la expansión de una bacteria que feminiza. Más apasionante aún sería la creación evolutiva de mecanismos nuevos para la determinación genética del género. Gracias al equipo de Rigaud se sabe que *Wolbachia* puede determinar el género de *A. vulgare.* Los machos portan todos los genes necesarios para convertirse en hembras. Para que un individuo sea macho basta con que la "glándula masculina" segregue una hormona de inducción masculina en una fase temprana del desarrollo. Si la bacteria parásita consigue impedir el desarrollo de esa glándula, su hospedador será hembra.

En algunas poblaciones infectadas, la responsabilidad de la determinación del género ha pasado de la cochinilla a su parásito. En las cochinillas se efectúa con el sistema WZ: los machos cuentan con cromosomas ZZ y las hembras con cromosomas WZ. (Este sistema difiere del XY al que estamos acostumbrados, donde los machos son XY y las hembras XX.) Debido a que sólo los pocos huevos que no contienen *Wolbachia* se convertirán en machos, las hembras WZ infectadas engendran en su mayoría a hermanas: hembras WZ y machos de sexo cambiado (hembras ZZ). Estas hembras ZZ, a su vez, engendran casi exclusivamente hembras ZZ. Por eso, de las hembras infectadas de ambos tipos nacen más hijas que de las hembras normales. Así, con cada generación, la proporción de individuos con el cromosoma femenino normal W disminuye y acaba por acercarse a cero. En ese punto, el parásito controla el sexo, ya que todas las cochinillas son ZZ —si tienen el parásito, son hembras; si no, machos—. Hay grupos donde parece que los hospedadores han logrado recuperar el control sobre el porcentaje de los géneros; determinan ellos, no se sabe aún cómo, la cifra de descendientes que reciben la bacteria.

La manipulación más común de *Wolbachia* es obstruir el éxito de los apareamientos de los hospedadores. Esta estrategia, o "incompatibilidad citoplásmica", comporta que todos los apareamientos entre machos infectados y hembras no infectadas resulten infértiles, ya que la bacteria suelta una toxina en el protoplasma del esperma (*véase el recuadro* "Sabotaje sexual"). Otros apareamientos no se ven afectados. Detener la procreación de hembras no infectadas beneficia indirectamente a las que albergan la bacteria. El resultado es que estas últimas contribuyen en una mayor proporción a la generación siguiente, gracias a lo cual la *Wolbachia* que transportan se propaga.

En virtud de esta intervención de la bacteria se restringe el flujo genético entre los diferentes grupos del hospedador. Es más pronunciado este efecto en la incompatibilidad citoplásmica bidireccional, donde dos grupos de hospedadores contienen cepas de la bacteria mutuamente incompatibles. En esas circunstancias, todos los apareamientos entre los hospedadores de los diferentes grupos están condenados a padecer el sabotaje interno.

Las barreras al flujo genético libre entre poblaciones revisten una importancia máxima para la especiación, el origen de nuevas especies. Tenemos un ejemplo clásico en la aparición de una barrera física: la formación de una nueva cordillera o la creación de una isla al subir el nivel del mar. Este obstáculo divide una población antes homogénea en dos; se impide la mezcla de las nuevas poblaciones y propicia derivas genéticas distintas. A lo largo del tiempo, los

grupos divergen hasta el punto de que ya no podrían cruzarse si se encontrasen de nuevo. Debido a que sus sistemas genéticos parentales ahora son incompatibles, la descendencia híbrida, o no sobrevive, o es estéril.

De camino a la especiación

Los biólogos familiarizados con *Wolbachia* se preguntaron si los impedimentos contra el flujo genético creados por la incompatibilidad citoplásmica no serían suficientes para que una población se bifurcase genéticamente, aun sin la existencia de una obstrucción física. ¿Eran esas bacterias los agentes de una "especiación infecciosa"?

Es difícil de contestar; el proceso por el cual una especie se divide en dos tarda demasiado en completarse. Lo mejor es analizar los hospedadores de *Wolbachia* que exhiben incompatibilidad citoplásmica y están en camino de especiarse. Se espera determinar de esta forma si el parásito es una fuerza que contribuye al nacimiento evolutivo de una nueva especie.

Parecen encontrarse al final de ese camino de la especiación dos especies de avispas parásitas del este de Estados Unidos, *Nasonia vitripennis* y *N. giraulti*. Johannes A. J. Breeuwer, de la Universidad de Amsterdam, y Werren hallaron que las barreras que se oponen a los apareamientos fructíferos entre esas especies no se deben tan sólo a las diferencias entre las mismas avispas, sino que interviene también *Wolbachia*. Cuando se trataba a ambas especies con antibióticos, los apareamientos entre ellas engendraban una descendencia fértil. Sin los antibióticos, la descendencia es inviable porque cada especie de avispa contiene una cepa diferente del parásito

Sabotaje sexual

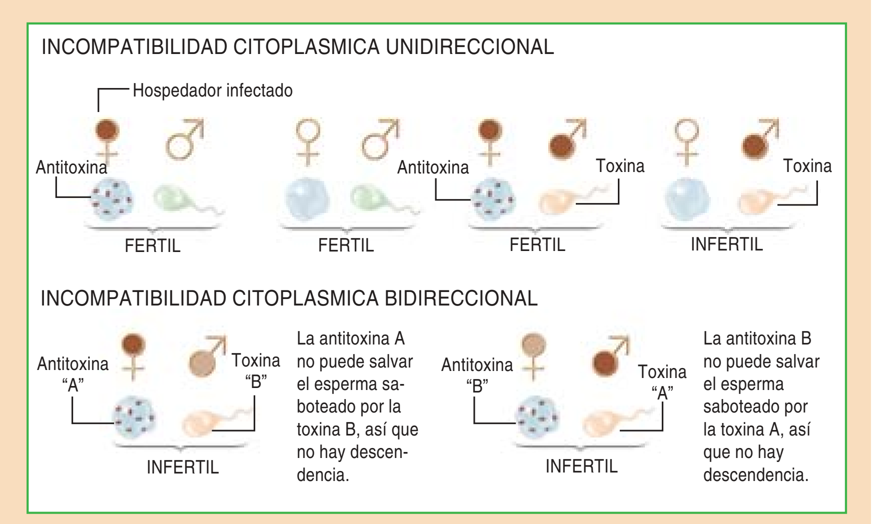
Una táctica adaptativa de algunas cepas de la bacteria parásita *Wolbachia* consiste en volver infructuosos ciertos apareamientos de los hospedadores. Al restringir el flujo de genes entre éstos, se cree que *Wolbachia* contribuye al desarrollo de una nueva especie.

La incompatibilidad citoplásmica tiene lugar cuando un macho infectado y una hembra no infectada intentan aparearse. En cuanto estrategia evolutiva, tiene la consecuencia indirecta de ayudar a los hospedadores que llevan parásitos dañando a los que no.

En los machos, algunas cepas de *Wolbachia* añaden una toxina al esperma del hospedador; es probable que altere las proteínas que se ligan con el ADN. El agente tóxico causa una condensación anormal de los cromosomas del macho en la fusión con el huevo y evita que se desarrolle el zigoto recién formado. Cuando el macho se aparea con una hembra infectada esa condensación no se produce. En ese caso, *Wolbachia* despliega en el huevo una antitoxina que rescata al zigoto.

Esta manipulación del hospedador por la bacteria ha sido interpretada como una perversidad evolutiva, puesta que reduce la fertilidad de las hembras no parasitadas sin que se beneficien de manera directa las bacterias que sabotean el esperma. No obstante, la estrategia sí resultaría exitosa: beneficia indirectamente a las hembras infectadas y, así, a las *Wolbachia* que albergan. Estas hembras no padecen restricciones al seleccionar sus apareamientos y, por consiguiente, disfrutan de una ventaja sobre las hembras libres de parásitos. Como las hembras infectadas engendran más hembras infectadas, esta estrategia promueve a su vez la propagación de la bacteria. Michael Turelli, de la Universidad de California en Davis, y Ary A. Hoffmann, de la Universidad La Trobe, en Australia, han descubierto claras pruebas del éxito de esta manera de proceder. En la parte oriental de los Estados Unidos, la cepa Riverside de *Wolbachia,* que causa incompatibilidad citoplásmica, se está extendiendo por el territorio de la población de su hospedador (la mosca de la fruta *Drosophila simulans*) a lo largo de un frente que se desplaza 100 kilómetros por año.

En la incompatibilidad citoplásmica unidireccional sólo actúa una cepa de *Wolbachia*, de manera que los apareamientos se sabotean en una única dirección. Reviste incluso mayor interés que no sea una sola cepa la que produce la incompatibilidad citoplásmica, a la que en tal caso se califica de bidireccional. Imagínense dos cepas bacterianas, A y B. Si la antitoxina que salva al huevo generada por la cepa A no es efectiva contra la toxina de la cepa B, y viceversa, los apareamientos serán incompatibles en ambas direcciones. Si la población entera está infectada o por una cepa o por la otra, los únicos apareamientos fructíferos serán entre individuos que alberguen la misma cepa. Las dos cepas de *Wolbachia* han dividido la población hospedadora en dos grupos que no pueden cruzarse.



3. PASAJEROS INDESEABLES: las bacterias *Wolbachia* se reproducen únicamente en sus hospedadores hembra; los machos son superfluos. Estos parásitos aparecen aquí como manchas de color verde más claro en un huevo de insecto (*arriba*) y como motitas dentro de una célula infectada (*abajo*).

y hay entre los hospedadores una incompatibilidad citoplásmica bidireccional.

Pero *Wolbachia* no es la única causa del actual aislamiento entre estas dos especies de *Nasonia*. La segunda generación de avispas híbridas tiende a sufrir graves problemas de desarrollo; quizá sea una indicación de que unos cambios genéticos en el propio ADN bastan ahora para mantener las dos especies separadas. No se ha determinado si el parásito contribuyó a esta divergencia en el pasado.

En el caso de la separación reproductiva de *N. giraulti* y *N. longicornis*, la historia es otra. Se ha determinado taxonómicamente que estas dos avispas parásitas pertenecen a especies diferentes; parasitan a grupos de hospedadores distintos. Pero, de nuevo, *Wolbachia* desempeña una función clave; aquí, causa incompatibilidad citoplásmica bidireccional. Werren y sus compañeros de la Universidad de Rochester Seth Bordenstein y Patrick O'Hara han mostrado hace poco que, en ausencia de la bacteria, los híbridos son normales y siguen siéndolo en las generaciones subsiguientes. Si bien no se ha producido todavía la divergencia genética de los ADN de las avispas, *Wolbachia* parece estar a punto de forzar la aparición de nuevas especies.

En algunos casos, *Wolbachia* puede contribuir al proceso de especiación sin ser la causa primaria. Un equipo de investigadores, entre ellos D. DeWayne Shoemaker, de la Universidad del Oeste de Michigan, Vaishali Katju, de la Universidad de Indiana, y John Jaenike, de la Universidad de Rochester, ha aportado pruebas de que incluso la barrera imperfecta que la incompatibilidad citoplásmica unidireccional le levanta al flujo genético contribuye al aislamiento reproductivo.

Shoemaker y sus colaboradores observaron dos especies de mosca de la fruta, *Drosophila recens* y *D. subquinaria*. La primera está infectada por una cepa de *Wolbachia* que causa incompatibilidad citoplásmica; la segunda no está infectada. Debido a ello, los apareamientos entre hembras de *D. subquinaria* y machos de *D. recens* son infértiles. Si *Wolbachia* fuese el único factor que interviniese, aún sería posible el flujo genético entre las especies de mosca de la fruta, pero esos apareamientos no tienen éxito. A diferencia de las de *D. subquinaria*, las hembras de *D. recens* son meticulosas cuando seleccionan machos; rara vez eligen por error uno de la otra especie. Las dos formas de barrera, pues, se complementan. *Wolbachia* evita el flujo genético en una dirección (aun cuando haya apareamientos) y una selección rigurosa por parte de las hembras de *D. recens* lo impide en la otra.

A pesar de estos y otros ejemplos, aún ha de demostrarse que exista la especiación infecciosa. Resulta notable, sin embargo, que las infecciones por *Wolbachia* prevalezcan sobre todo en insectos y ácaros, los grupos de animales más ricos en especies. Quizá *Wolbachia* alimentó nuevos brotes en esas frondosas ramas del árbol de la vida.

¿Quién lleva la batuta?

Lejos de ser un parásito menor, la *Wolbachia* está muy repartida por la naturaleza y manipula de distintas formas la reproducción de toda una variedad de organismos hospedadores. Más aún, los intentos de éstos de evadir la infección han orientado su biología y evolución por direcciones inesperadas. Esperamos que nos aguarden nuevas sorpresas cuando se explore la biología aún oculta de *Wolbachia*.

Bibliografía complementaria

INFLUENTIAL PASSENGERS: INHERITED MICROORGANISMS AND ARTHROPOD REPRODUCTION. S. L. O'Neill, A. A. Hoffmann y J. H. Weeren. Oxford University Press, 1997.

SEX-RATIO-DISTORTING *WOLBACHIA* CAUSES SEX-ROLE REVERSAL IN ITS BUTTERFLY HOST. F. M. Jiggins, G. D. D. Hurst y M. E. N. Majerus en *Proceedings of the Royal Society of London B*, vol. 267, n.º 1438, páginas 63-68; 7 de enero de 2000.

WOLBACHIA-INDUCED INCOMPATIBILITY PRECEDES OTHER HYBRID INCOMPATIBILITIES IN *NASONIA*. S. R. Bordenstein, F. P. O'Hara y J. H. Werren en *Nature*, vol. 409, n.º 6821, páginas 707-710; 8 de febrero de 2001.

SEXUAL SELECTION IN AN ISOPOD WITH *WOLBACHIA*-INDUCED SEX REVERSAL: MALES PREFER REAL FEMALES. J. Moreau, A. Bertin, Y. Caubet y T. Rigaud en *Journal of Evolutionary Biology*, vol. 14, n.º 3, páginas 388-394; mayo de 2001.

Física de los modos discretos

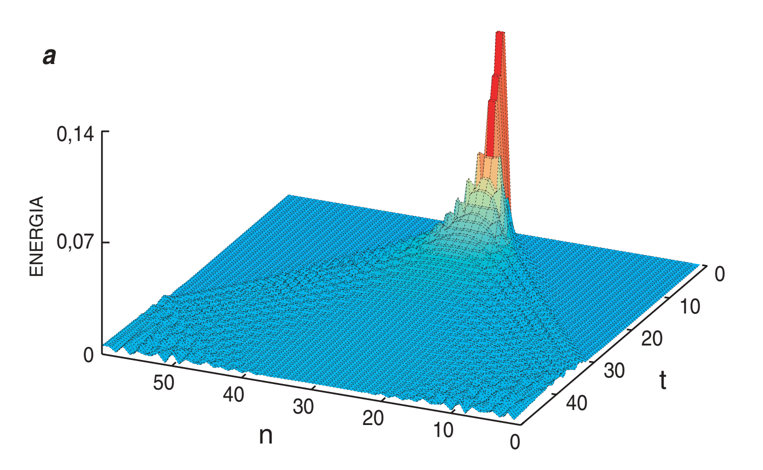
Se han detectado en ciertas redes superconductoras los modos discretos, unas soluciones dinámicas donde la energía permanece confinada. Se trata de la confirmación experimental de una teoría no lineal

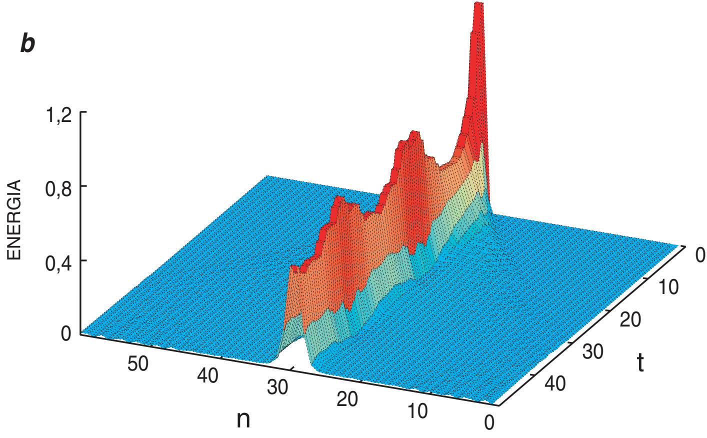
Luis M. Floría, José Luis Marín, Juan José Mazo

Los últimos decenios del siglo XX asistieron al desarrollo de la ciencia no lineal, expresión que engloba un ingente número de avances en dominios fundamentales de la matemática, con aplicación directa a la física de campos y sistemas macroscópicos y ramificaciones en biología, economía y sociología. Hoy sabemos que en un sistema no lineal, al contrario que en uno lineal, "el todo es mucho más que la suma de sus partes". Es una característica distintiva de la no linealidad la aparición de modos de comportamiento del sistema que, sencillamente, no existen en las aproximaciones lineales de teorías o modelos. Entre esos conceptos "emergentes" de la no linealidad, algunos ya forman parte de la cultura científica popular (por ejemplo, el caos), pero hay otros que, pese a ser menos conocidos, no por ello son menos importantes.

Uno de los conceptos clave no lineales que mayor grado de universalidad han alcanzado en sus aplicaciones a la física y la técnica es el de estructura coherente. Los vórtices, ondas solitarias y frentes de la dinámica de fluidos, las dislocaciones de los sólidos bajo deformaciones plásticas y los solitones de la óptica no lineal, entre otros, son fenómenos que admiten una sistematización teórica en torno a la noción de estructura coherente.

Muchos de estos ejemplos de estructura coherente poseen carga topológica. Al igual que para deshacer un nudo simple en una cuerda infinita sería necesario modificar la forma de la cuerda a lo largo de



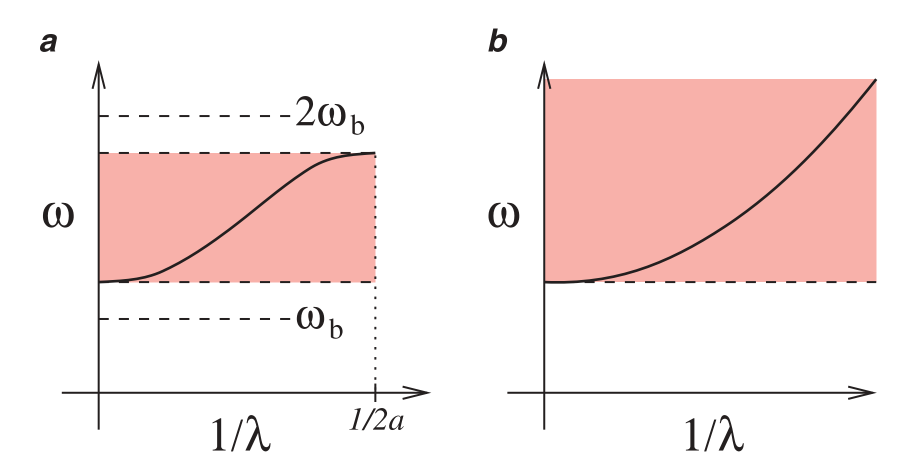


una longitud asimismo infinita, la desaparición de una de estas excitaciones presente en un medio infinito exigiría la modificación sustancial del estado de una parte infinita del mismo. La posesión de carga topológica dota de gran estabilidad a una estructura coherente. Pero no todas las estructuras coherentes poseen esta propiedad.

Un tipo de estructura coherente sin carga topológica que ha recibido recientemente una intensa atención son los modos intrínsecos localizados discretos (*discrete breather*). Los modos discretos, así los abreviaremos en adelante, constituyen soluciones de la dinámica de un campo o medio discreto (red), en las que el perfil espacial de la densidad de energía presenta un gráfico agudamente localizado en unos pocos sitios de la red; decae de manera exponencial al alejarnos del centro de localización. Al no poseer carga topológica, tanto su creación como su desaparición sólo exigen la modificación significativa de un número muy pequeño de componentes del medio.

Examinaremos con cierto detalle la física básica de los modos discretos, a fin de determinar qué propiedades características de un medio posibilitan su existencia. Encontraremos que siempre que el medio sea discreto y no lineal habrá que esperar la presencia de este fenómeno de localización intrínseca.

La búsqueda experimental de dichos estados ha dado como resultado su reciente observación en dispositivos superconductores de escala micrométrica. La interpretación de estos experimentos reposa sobre la dinámica no lineal de la fase del estado cuántico macroscópicamente ocupado (estado superconductor). Estas investigaciones no sólo asientan sobre base experimental firme la noción de modo discreto, sino que abren también la puerta a potenciales aplicaciones de la misma en microtécnica superconductora.



2. DIAGRAMA DE BANDAS de los modos de radiación, para medios discretos (*a*) y continuos (*b*). Se representa la frecuencia ω frente al inverso de la longitud de onda espacial del modo, λ. En ambos casos estos modos constituyen las soluciones de muy baja amplitud, límite en el cual podemos suponer que el medio es lineal. El perfil de dichas soluciones es el de una onda sinusoidal, de la forma sen($2\pi x/\lambda - \omega t$). En el caso discreto las soluciones se denominan modos normales; en el continuo, ondas planas. En nuestro contexto lo fundamental es que los medios discretos presentan siempre una longitud de onda mínima, igual a dos veces el espaciado entre osciladores. Por ello la banda siempre está acotada, lo que posibilita que la frecuencia fundamental del modo discreto ω_b y todos sus armónicos superiores puedan quedar fuera de resonancia.

La importancia de ser discreto

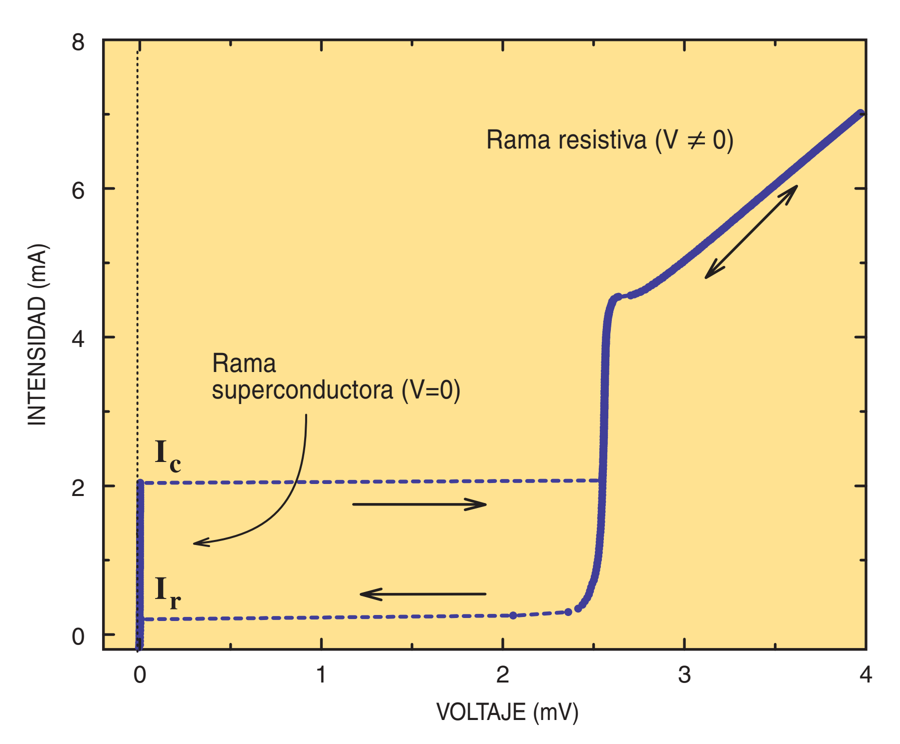
En un medio material homogéneo, la interacción mutua entre sus componentes tiende a repartir la energía por el sistema. Una concentración de energía inicialmente localizada, es decir, confinada en una pequeña región espacial, muestra tendencia a extenderse por todo el medio mediante radiación: oscilaciones de muy baja amplitud del medio que se propagan por el sistema. Sólo si por alguna razón un estado de energía localizada es incapaz de ceder su energía a los modos de radiación, puede darse en la realidad tal estado de localización intrínseca. Veamos cómo.

Para movernos con mayor precisión, supondremos que el estado de localización intrínseca es una oscilación del medio material de frecuencia ω_b. Si el valor de ω_b coincide con alguna de las frecuencias de radiación del sistema (la banda), el estado de localización excitará dicho modo de radiación y se deslocalizará, repartiéndose la energía por toda la red. Por ello, sólo si el valor de ω_b queda fuera de la banda, podría la energía permanecer confinada en un espacio tan limitado.

En un medio lineal homogéneo, esto es, de componentes idénticos, las frecuencias de los modos de gran amplitud son las mismas que las de los modos de pequeña amplitud. De ahí que el estado de localización radie. Una manera de evitar tal fenómeno es que en el medio haya defectos o impurezas, porque éstos vibran con frecuencias características, distintas de las frecuencias de la banda. A esos modos localizados de vibración los conocemos por modos de impureza.

En un medio no lineal, aun cuando sea homogéneo, existe en princi-

1. EJEMPLO DE FORMACION DE UN MODO DISCRETO. Se simula el comportamiento de una red no lineal frente a una perturbación inicial muy localizada. Cuando la alteración es de baja amplitud, de baja energía, el medio se comporta como una red lineal; toda la energía se dispersa en forma de radiación (*a*). En una perturbación drástica (*b*), las oscilaciones producidas son de una frecuencia muy distinta de las de los modos de radiación; no hay, pues, resonancia. Tras una fase transitoria inicial en la que se radia una pequeña cantidad de energía, permanece estable el modo localizado. Nótese la gran diferencia en la escala de energías de uno y otro caso.



3. CURVA I-V TIPICA de una unión Josephson sometida a una corriente externa. Al aplicar la corriente, la unión permanece en el estado superconductor hasta alcanzar un valor crítico I_c, momento en el cual el voltaje salta hasta el voltaje de intervalo de la unión, unos 2,5 *m*V (el voltaje entre las dos partes de ésta). Si aumentamos aún más la corriente, el voltaje se mantiene en este valor hasta un punto a partir del cual crece linealmente con la corriente. La pendiente de este tramo nos da la resistencia normal de la unión. Si ahora disminuimos la corriente, la unión no retorna al estado superconductor para el valor de I_c, sino para un valor menor que define la corriente de retorno I_r. La existencia de ese ciclo de histéresis posibilita la excitación de soluciones localizadas para valores de la corriente situados aproximadamente entre I_c e I_r. El experimento se realizó a 5,2 kelvin.

pio la posibilidad de estados de vibración localizada con frecuencias fuera de la banda de radiación. La frecuencia de una oscilación anarmónica, es decir, no lineal, depende de la amplitud de ésta. En consecuencia, la frecuencia del estado de localización (de gran amplitud) puede diferir de la frecuencia de los modos de radiación (de pequeña amplitud).

Pero una oscilación anarmónica de frecuencia ω_b presenta contenido en frecuencias múltiplos enteros $n\omega_b$ de esta frecuencia, que, en caso de entrar en la banda, proporcionarían el mecanismo de deslocalización de la energía por excitación de radiación. Por ello, para que la localización de la energía se preserve, ningún valor de $n\omega_b$ presente en el espectro de la oscilación localizada debe pertenecer a la banda.

¿Cómo podemos esperar que ello ocurra? En la dinámica de los sistemas hamiltonianos, así se llaman los que conservan la energía, la condición mencionada es fácil de cumplir para las ecuaciones de evolución temporal de los medios discretos, donde la banda es un intervalo acotado y existe una frecuencia de radiación máxima. Sin embargo, en un medio estrictamente continuo, sin escala mínima de longitud, la banda no está acotada superiormente y siempre hay múltiplos de la frecuencia ω_b pertenecientes a la banda.

Es cierto que existen sistemas continuos, llamados integrables, en los que una oscilación localizada de frecuencia perteneciente a la banda es "perpendicular" a los modos de radiación, y no puede excitarlos. Se trata, sin embargo, de situaciones excepcionales. En general, podemos decir que la discretitud y la no linealidad son los rasgos de un medio material que cooperan para hacer posible la solidez de los estados de localización intrínseca.

La exposición anterior, pese a su carácter heurístico, señala correctamente las condiciones necesarias para construir una prueba rigurosa de existencia de los estados de localización intrínseca en un sistema genérico de osciladores hamiltonianos no lineales en interacción. La prueba llegó en 1994 de la mano de Robert S. Mackay, ahora en la Universidad de Warwick, y Serge Aubry, en el CEA de Saclay. La idea esencial de la prueba matemática de existencia consiste en prolongar, para valores no nulos de la interacción interna del medio, los estados de energía localizada que se pueden construir trivialmente en ausencia de interacción.

La técnica de prolongación de estados desde el límite ultradiscreto o anticontinuo es una valiosa herramienta formal en el estudio de la dinámica no lineal de campos discretos. Proporciona, además, las bases de un procedimiento numérico, desarrollado por uno de los autores (Marín), de precisión suficiente para abordar la caracterización cuantitativa del comportamiento y propiedades de los estados de localización intrínseca en cualquier modelo que los posea.

El teorema de existencia de modos discretos pronto se extendió al caso de sistemas forzados y amortiguados. La generalidad del mismo asegura la existencia del fenómeno de localización intrínseca en un amplio conjunto de modelos en física de la materia condensada.

En el caso de sistemas amortiguados y forzados, el estado de localización intrínseco es un atractor de la dinámica en vastas regiones del espacio de parámetros del modelo. Por ello, estos estados presentan una característica robustez frente a perturbaciones de baja intensidad (la temperatura, por ejemplo).

Que el estado localizado sea un atractor de la dinámica de la red quiere decir que, si éste se perturba ligeramente, el sistema evoluciona hacia la situación de par-

Los autores

LUIS MARIO FLORIA, JOSE LUIS MARIN y JUAN JOSE MAZO son miembros del departamento de teoría y simulación de sistemas complejos del Instituto de Ciencia de Materiales de Aragón (CSIC-Universidad de Zaragoza) y del departamento de física de la materia condensada de la Universidad de Zaragoza. Floría fue supervisor de los trabajos doctorales de Marín y Mazo. Marín completó su formación en Saclay, Cambridge y Edimburgo; Mazo, en el Instituto de Tecnología de Massachusetts.

tida. Al cruzar los bordes de esas regiones de parámetros en que el modo discreto es atractor, el estado de oscilación periódica localizada pierde su estabilidad. En algunos casos, la pérdida de estabilidad origina estados en los que la posición de localización de la energía varía en el tiempo, es decir, cuando nos hallamos ante modos discretos móviles.

El comportamiento de los modos discretos móviles difiere según los valores de los parámetros del modelo. Ahora bien, en ciertas ocasiones, se comportan como partículas con pocos grados de libertad internos, con choques elásticos entre ellos, etcétera. En otras ocasiones se produce atrapamiento de unos modos discretos por otros. Y se han observado incluso fenómenos de detonación, en los que el choque de modos discretos desencadena situaciones de turbulencia.

No siempre la pérdida de estabilidad del atractor localizado periódico inmóvil produce su movilidad. Es muy frecuente que tales inestabilidades debidas a la variación de los parámetros generen excitaciones de movimientos internos coherentes (modos discretos cuasiperiódicos) o incluso caóticos (caos intrínsecamente localizado), sin que se destruya la localización de la energía. En este último caso, la localización soporta oscilaciones internas caóticas del modo discreto merced a la "rápida" amortiguación de la radiación emitida por las vibraciones caóticas del oscilador central.

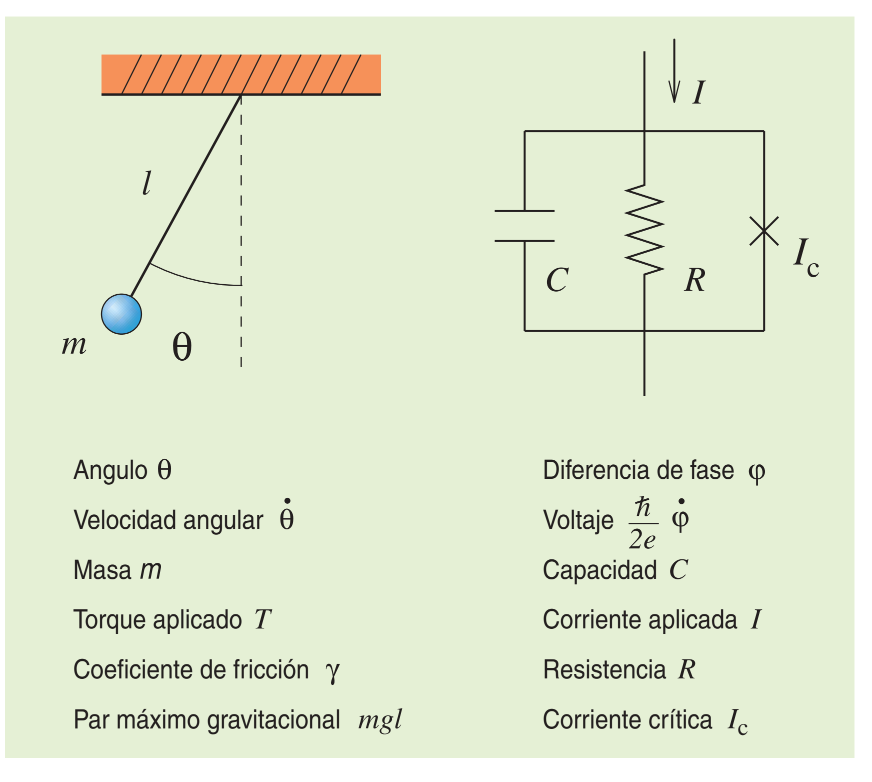
Quizás el mayor reto que afronta la teoría de la localización intrínseca sea la extensión rigurosa de la misma al dominio de los sistemas gobernados por la mecánica cuántica. Este problema se enmarca en la cuestión general de las manifestaciones cuánticas, caso de que las haya, de los comportamientos típicamente no lineales, cuyas dificultades no hacen sino poner de manifiesto las insuficiencias de nuestra comprensión actual sobre el tránsito entre la mecánica cuántica y la mecánica clásica.

Efecto Josephson

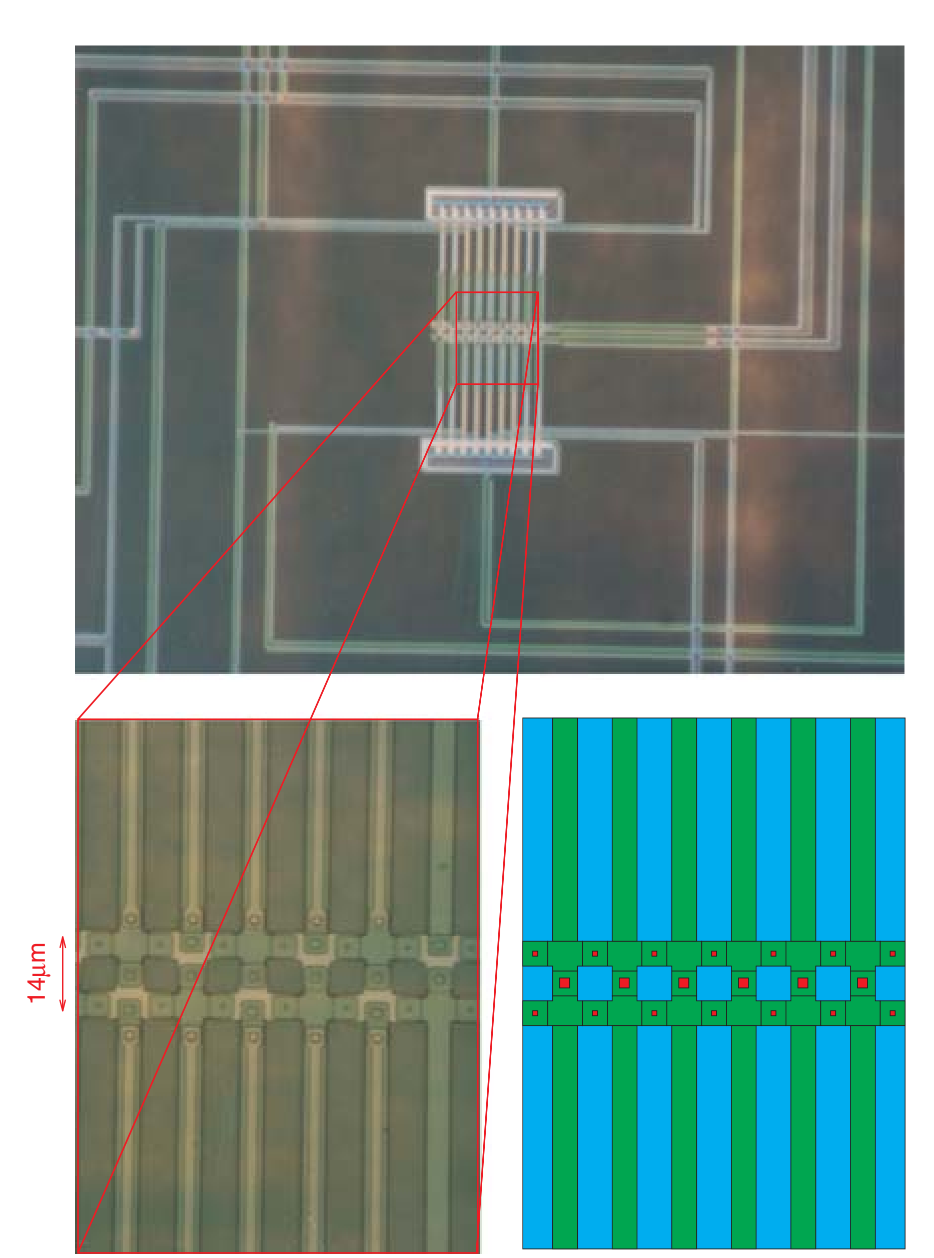
Una teoría física no sólo ha de ser formalmente correcta. Se requiere, además, que sea capaz de predecir resultados verificables mediante experimentos cuidadosamente realizados. Por ello era importante encontrar sistemas experimentales idóneos donde poner de manifiesto la existencia real de los estados de localización intrínseca. Nuestra propuesta fue, desde un principio, los dispositivos electrónicos superconductores basados en el efecto Josephson, que establece el flujo de corriente eléctrica entre dos superconductores separados por una fina capa de aislante. A los dispositivos que presentan dicho efecto se los denomina uniones Josephson.

En un superconductor los electrones se comportan de modo coherente formando los pares de Cooper. (Bajo condiciones normales los electrones se repelen entre sí, pero en un superconductor es como si se atrajeran a pares, los pares de Cooper.) Tal coherencia de los electrones queda reflejada en el hecho de que el estado cuántico superconductor viene descrito por un número complejo, cuyo módulo está relacionado con el número de pares en el superconductor y cuya fase es en principio arbitraria.

La mecánica cuántica permite que se produzca un túnel de pares de Cooper a través del aislante. En virtud de ese efecto, una partícula (aquí un par de Cooper es como una partícula) atraviesa una barrera que se opone a su movimiento, aun cuando aquélla no disponga de la energía suficiente para superarla. La mecánica cuántica predice la posibilidad de estos túneles que



4. EL PENDULO constituye una analogía mecánica muy útil para representar la dinámica de una unión Josephson. Se ofrece un cuadro de equivalencias entre los parámetros físicos de un péndulo (*izquierda*) y los de una unión Josephson (*derecha*).



5. RED SUPERCONDUCTORA fabricada para hallar modos discretos (*arriba*). Las islas superconductoras, de niobio, están separadas entre sí por una fina capa de óxido de aluminio, un aislante. El área de las uniones verticales es mayor que el de las horizontales. La temperatura de experimentación debe ser inferior a 9,2 kelvin, por debajo de la cual el niobio es superconductor. También es necesario tener especial cuidado en aislar la muestra de campos magnéticos espurios procedentes del exterior. Además de las islas superconductoras y uniones que forman la escalera (*centro superior*), se aprecian las múltiples conexiones que reparten homogéneamente la corriente y permiten medir el voltaje en distintos puntos de la red. Abajo, a la izquierda, se ilustra un tramo de la escalera superconductora; a su derecha, un esquema del mismo tramo. Las islas superconductoras son de niobio; en rojo se indican las uniones Josephson Nb-Al_2O_x-Nb. Aparte de la configuración en escalera, la figura también muestra los tramos superconductores por los cuales se inyecta y extrae la corriente externa.

permiten el paso de los pares de Cooper de un superconductor a otro, a través de la barrera de aislante que clásicamente sería imposible de superar.

En una unión Josephson la mayoría de sus propiedades guardan relación con el valor φ de la diferencia entre las fases de los números complejos que definen el estado superconductor a cada lado de la barrera. La corriente a través de la unión es proporcional al seno de φ; el voltaje a ambos lados de la barrera es proporcional a la derivada temporal de φ (la velocidad con la que φ cambia en el tiempo). Conociendo, pues, el valor de esa diferencia de fase sabemos el comportamiento de la unión.

En una unión Josephson podemos medir la curva de la relación entre intensidad de la corriente aplicada y diferencia de potencial (I-V). Cuando se hace pasar corriente a través de la unión, ésta se mantiene superconductora (voltaje nulo) hasta un valor crítico de la corriente I_c. Por encima de este valor, la energía que se comunica a los electrones rompe pares de Cooper, con el consiguiente salto de la unión hacia un estado resistivo de voltaje no nulo.

Conforme aumentamos la corriente, se van rompiendo más pares mientras el voltaje no cambia, hasta que la fase superconductora termina por desaparecer; a partir de ese momento la curva es lineal y similar a las del estado normal. Pero si disminuimos la corriente, la curva no recorre el camino de vuelta, sino que la unión recupera el estado superconductor a un valor pequeño de la corriente.

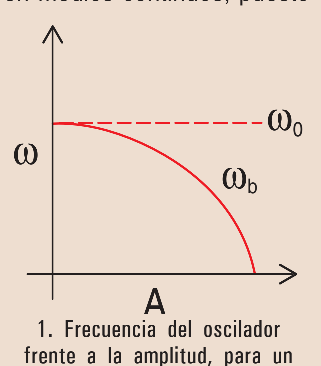
En 1968 W. C. Stewart y D. E. McCumber idearon un mismo modelo para el estudio de dicho experimento. Se parte en él de la hipótesis de tres canales para el transporte de la corriente eléctrica. El primer canal, la unión Josephson ideal, explica el transporte de corriente con voltaje nulo por debajo de la corriente crítica. El segundo, un canal resistivo normal, da cuenta de la contribución al transporte de todos los electrones que no están apareados. Por último, la unión consta de dos metales separados por una capa de aislante; se comporta como un condensador.

A la vista de las ecuaciones para la dinámica de la unión, el comportamiento de ésta al paso de la

Localización intrínseca

Se llama localización intrínseca al fenómeno de confinamiento espacial de la energía en un campo o sistema material discreto y homogéneo, descrito físicamente por ecuaciones no lineales. Ocurre gracias al efecto conjunto de la no linealidad y la discretitud del medio. Para entender dicho fenómeno hemos de conocer el papel que desempeña el espectro de excitaciones lineales del medio, es decir, las frecuencias de los modos de vibración con amplitudes infinitesimalmente pequeñas (también llamados modos de radiación o modos fonónicos). Un modo localizado sólo puede mantenerse cuando sus frecuencias características no resuenan con las de dichos modos, ya que el resto del medio, si se halla en reposo, responde con esas frecuencias de radiación.

Un medio elástico discreto presenta un espectro fonónico acotado. Las frecuencias están comprendidas dentro de una banda, en la cual siempre hay un valor máximo, correspondiente al modo de vibración con la longitud de onda mínima: dos veces el espaciado entre osciladores. En cambio, un medio continuo presenta un espectro sin límite superior en frecuencias, puesto que no existe una longitud de onda mínima para los modos lineales. Así pues, es imposible tener modos localizados en medios continuos, puesto que siempre existirá algún armónico superior de dicho modo en resonancia con la banda infinita.



1. Frecuencia del oscilador frente a la amplitud, para un oscilador armónico (ω_0) y para uno anarmónico (ω_b).

No basta, sin embargo, con que el medio sea discreto. En los modelos lineales, tampoco es posible la localización. En este contexto, se entiende por modelo lineal aquel en el que todos los potenciales son armónicos. Y un oscilador armónico se caracteriza por tener una misma frecuencia de oscilación ω_0 independientemente de la amplitud.

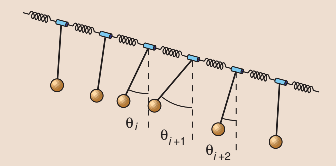
Por tanto, cualquier excitación está siempre en resonancia con la banda fonónica. El espectro de excitaciones de baja amplitud coincide con el de excitaciones a cualquier amplitud. Distinta es la situación en los osciladores no lineales. En ellos la frecuencia ω_b cambia con la amplitud, con lo cual es posible que una oscilación localizada deje de estar en resonancia con la banda. Pero también será necesario que todos los armónicos superiores de dicha oscilación anarmónica se hallen fuera de resonancia. La anchura de la banda viene dada por el grado de discretitud de la red, es decir, por la intensidad del acoplamiento entre osciladores vecinos.

Un ejemplo

Sea una cadena lineal de péndulos, unidos por muelles de torsión. Los péndulos oscilan en el plano perpendicular a la cadena; los muelles proporcionan un acoplamiento entre cada péndulo y sus dos vecinos inmediatos. Cada péndulo por separado oscila debido al campo gravitatorio. Si utilizamos como variable el ángulo θ que forma el péndulo con la vertical, deduciremos que la energía potencial del péndulo es $E = mgl(1 - \cos\theta)$. Para simplificar, tomaremos la masa m y la longitud del péndulo l como la unidad, y trabajaremos en unidades de $g = 1$. Si concedemos la ausencia de fricción, la ecuación del movimiento de este péndulo "matemático" es $\ddot{\theta} + \operatorname{sen}\theta = 0$. Este tiene una frecuencia de vibración ω que decrece monótonamente con la amplitud.

Los muelles pueden modelizarse mediante la ley de Hooke. Es decir, entre un péndulo en el sitio n y su vecino en el sitio $n + 1$ el muelle ejerce una fuerza directamente proporcional a la diferencia de ángulos, de forma que la energía potencial elástica es $E = ½ K\ (\theta_n - \theta_{n+1})^2$. Finalmente, la ecuación del movimiento para los péndulos acoplados queda así:

$$\ddot{\theta}_n + \operatorname{sen}\theta_n + K(2\theta_n - \theta_{n+1} - \theta_{n-1}) = 0$$



2. Cadena de péndulos no lineales acoplados.

Esta ecuación representa un modelo muy utilizado en ciencia no lineal. Su expresión matemática contiene un elemento no lineal (el término del seno) que hace que su tratamiento no sea nada trivial.

Aunque ecuaciones como ésta no son resolubles analíticamente, es decir, no es posible encontrar "con lápiz y papel" soluciones generales del movimiento, es muy fácil obtener cualquier solución en el ordenador, integrando numéricamente las ecuaciones a partir de cualesquiera condiciones iniciales. Sí podemos obtener analíticamente las frecuencias correspondientes a la banda de radiación; basta con linealizar la ecuación anterior (en este caso, simplemente aproximar $\operatorname{sen}\theta_n \approx \theta_n$). El resultado es un espectro de frecuencias de la forma:

$$\omega_{lin} = 1 + 4K \operatorname{sen}^2 (\pi/\lambda)$$

En definitiva, la red de osciladores en reposo tiene unas frecuencias características que barren una banda de valores comprendidos entre 1 y $1 + 4K$. El parámetro K, que mide el grado de "discretitud" de la red, nos proporciona la anchura de esta banda. Así pues, es más fácil cumplir los requisitos de no-resonancia cuanto más discreta sea la red y más estrecha resulte la banda.

La teoría

El argumento físico que acabamos de exponer nos permite entender la posibilidad de los modos intrínsecos localizados. Pero incluso en el más simple de los casos, uno de estos modos comporta seis o más osciladores y no podemos aplicar el razonamiento anterior. Afortunadamente, en 1994 Robert S. MacKay y Serge Aubry dieron con la solución, en forma de un teorema de existencia de aplicabilidad muy general. Se trata del concepto de límite anticontinuo, también llamado a veces antiintegrable.

El límite anticontinuo de una red de osciladores es aquel en el que los osciladores están desacoplados. En nuestro ejemplo, corresponde a hacer $K = 0$. En ese límite la red es una simple colección de osciladores no lineales independientes. Basta poner un oscilador a vibrar con cierta amplitud y dejar el resto en reposo. El teorema recurre entonces a la técnica matemática de continuación homotópica: ciertas configuraciones de "modos localizados", como el ejemplo puesto, tienen continuación analítica cuando hacemos $K \neq 0$, es decir, cuando acoplamos la red. Lejos de quedarse en un teorema abstracto, esta idea de continuación desde el límite desacoplado da una nueva y potente intuición acerca del origen y del mecanismo subyacente en la localización intrínseca. Proporciona, además, el método numérico para calcular modos localizados con total precisión.

corriente es análogo al comportamiento de un péndulo simple forzado y amortiguado. Al comportarse a la manera de un péndulo, la unión Josephson constituye un sistema experimental idóneo para el estudio de los fenómenos no lineales.

Experimentos en una escalera

No es difícil fabricar redes donde las islas superconductoras están separadas entre sí por finas barreras de aislante; se las llama redes de uniones Josephson. Desde el punto de vista físico, son una realización experimental de un conjunto de péndulos acoplados, y por ello un sistema ideal para el estudio de las redes de osciladores no lineales.

Son muchos los fenómenos no lineales que pueden estudiarse experimentalmente mediante el diseño de tales redes. Por ello propusimos que los estados de localización intrínseca deberían observarse en alguna configuración particular de red de uniones Josephson. A tal efecto se diseñó la red mostrada en la figura 5. Consta de un archipiélago superconductor cuyas islas se disponen según la geometría de una escalera y formando uniones Josephson entre sí.

Cada unión vertical de la escalera, alimentada por la corriente externa, se comporta como un péndulo forzado y amortiguado. Además, está acoplada a sus vecinas a través de las uniones horizontales. El tipo de acoplamiento favorece que las uniones contiguas se comporten igual, manteniendo una misma fase.

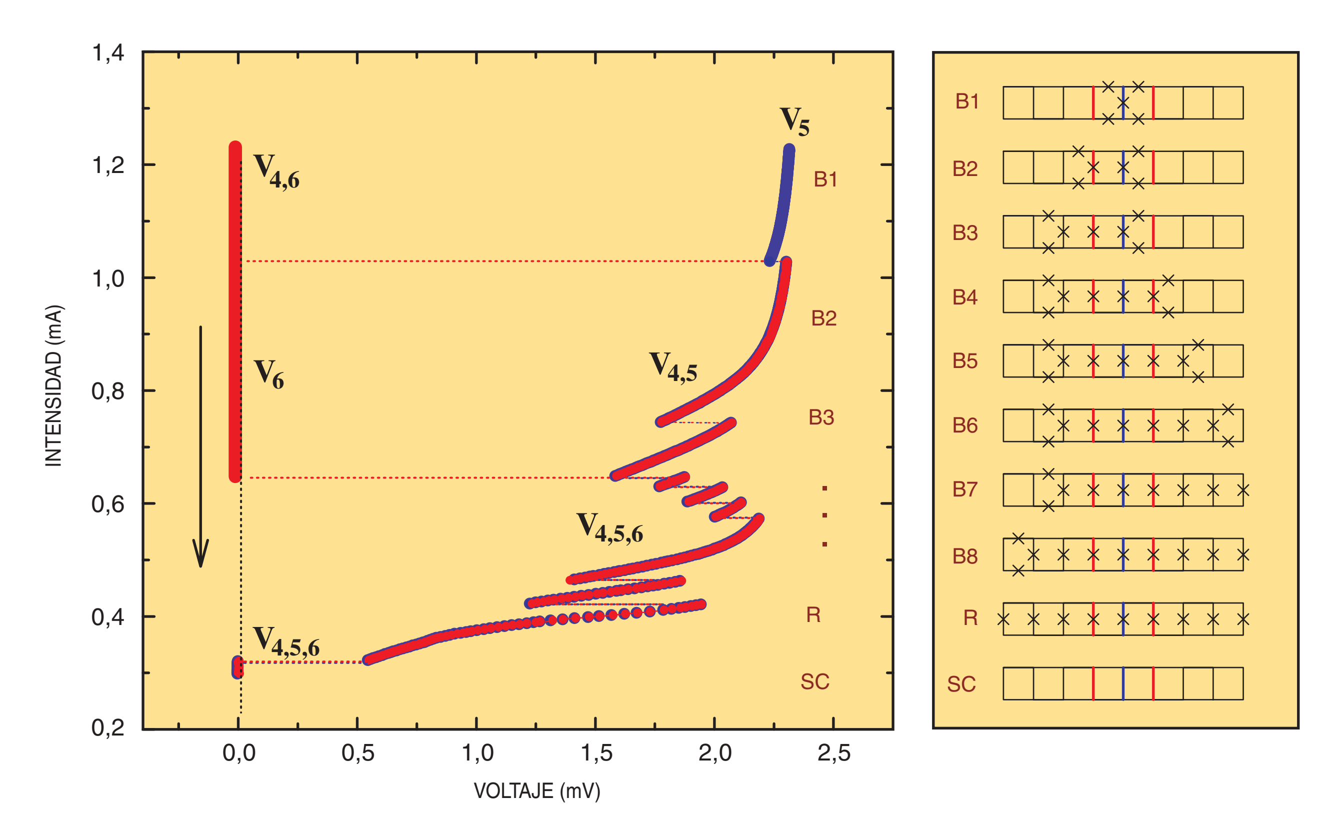
Variando de una muestra a otra el área de las barreras de aislante de las uniones horizontales (en realidad, el área relativa de las uniones horizontales respecto las verticales), el diseño permite controlar la intensidad del acoplamiento entre uniones. Así, una unión con una barrera de mayor área produce un acoplamiento mayor.

Por estar acopladas las uniones verticales, normalmente se observa que todas se comportan igual; no hay, por tanto, localización. Pero nuestro sistema puede sostener estados localizados, una vez éstos hayan sido excitados. Hemos visto que en el caso de uniones aisladas, cuando la corriente externa se halla comprendida entre I_r e I_c, cada unión puede encontrarse en un estado resistivo de $V \neq 0$ o superconductor, $V = 0$. Un modo discreto en la escalera corresponde a un estado en el que todas las uniones verticales, menos una, se encuentran en el estado superconductor; la excepción se halla en el estado resistivo. Todas, empero, se alimentan por la misma corriente externa.

En algunos casos se ha observado la aparición espontánea de modos discretos en la red fabricada (*figura 5*). Sin embargo, existen métodos sencillos de excitar controladamente la solución localizada en la escalera. Podemos, por ejemplo, aplicar una corriente homogénea a la red hasta un valor comprendido entre I_c e I_r. Inyectamos entonces una corriente extra sólo a una de las uniones, la situada en el lugar donde queremos excitar el modo discreto, hasta que se consigue que esa unión y sólo esa pase al estado resistivo de voltaje no nulo. Si ahora disminuimos la corriente extra hasta suprimirla, la curva sigue la parte superior del lazo de la figura 3 y la unión se mantiene en el estado resistivo. En esta situación la red está forzada uniformemente, pero la energía está localizada y se ha excitado el modo discreto.

Para detectar los modos localizados en la red superconductora se mide el voltaje en distintas uniones de la misma. Las observaciones experimentales de los estados de localización intrínseca se llevaron a cabo en los laboratorios del departamento de ingeniería eléctrica y computación del Instituto de Tecnología de Massachusetts, donde uno de los autores (Mazo) realiza-

6. RESULTADO DE EXCITAR UN MODO DISCRETO en la escalera, a unos 1,4 miliampère, y aumentar la corriente. A la intensidad indicada, el modo ha sido excitado en la quinta unión: $V_5 \neq 0$ (*azul*) mientras que $V_4 = V_6 = 0$ (*rojo*). En el dibujo de la escalera hemos puesto una cruz sobre cada unión en el estado resistivo y nada en el caso de las uniones en el estado superconductor. En el estado localizado, las únicas uniones que se encuentran en el estado resistivo son la quinta unión vertical y sus vecinas horizontales. Al aumentar la corriente externa, el modo discreto es estable hasta una corriente cercana a I_c en cuyo valor todas las uniones verticales saltan al estado resistivo y se comportan igual ($V_5 = V_4 = V_6 = V_j$; j = 1, ..., 9). Entonces, todas las uniones horizontales se hallan en estado superconductor. El experimento se realizó a 5,2 kelvin.



7. RESULTADO DE EXCITAR UN MODO DISCRETO en la escalera, a unos 1,2 miliampère, y disminuir la corriente. A la intensidad indicada, el modo ha sido excitado en la quinta unión: $V_5 \neq 0$ (*en azul*) mientras que $V_4 = V_6 = 0$ (*en rojo*). A la derecha dibujamos la escalera de nueve uniones verticales e indicamos con una cruz las uniones en el estado resistivo y con nada las uniones en el estado superconductor. Creado el modo discreto de un sitio (estado *B1*), las uniones que se encuentran en el estado resistivo son la quinta unión vertical y sus vecinas horizontales. Al bajar la corriente externa, el estado se desestabiliza dando lugar al modo discreto de dos sitios (*B2*). La cuarta unión ha saltado al estado resistivo, mientras que la sexta permanece en el superconductor. Si seguimos bajando la corriente encontramos nuevos saltos en el voltaje, que asociamos al paso de una de las uniones verticales desde el estado superconductor al resistivo. Tras el estado *B2* encontramos los estados *B3* (un modo discreto de tres sitios), *B4* (modo discreto de 4 sitios en el cual participa también la sexta unión vertical, $V_6 \neq 0$), *B5*, *B6*, *B7*, *B8*, *R* (en el cual todas las uniones verticales rotan uniformemente) y finalmente la red retorna a su estado superconductor (*SC*) al alcanzar la corriente de retorno, ligeramente superior a 0,3 mA en el ejemplo. El experimento se realizó a 6,0 kelvin.

ba una estancia posdoctoral. Otro grupo de experimentadores de la Universidad de Erlangen, convencidos del interés de nuestra propuesta, abordaron con éxito experimentos análogos de observación de modos discretos en escaleras de uniones Josephson.

A pesar del origen cuántico del efecto Josephson, los estados de localización intrínseca observados en estos experimentos son modos discretos clásicos. Ello se explica por el gran tamaño de las islas superconductoras, que permite despreciar las fluctuaciones del módulo de la función de ondas cuántica macroscópica del estado superconductor. En este régimen importa la dinámica clásica de las fases para la descripción del sistema. Si se disminuye lo suficiente el tamaño de las islas superconductoras, se requieren el módulo y la fase de la función de ondas. Puesto que estas variables satisfacen entre sí relaciones de indeterminación cuántica, se habla entonces de régimen cuántico del sistema de uniones.

Ya hemos mencionado que la extensión de la teoría de la localización intrínseca al dominio de la mecánica cuántica es una tarea pendiente. Una de las ventajas de las redes de uniones Josephson como sistemas experimentales donde investigar la localización intrínseca radica en la posibilidad de diseño de redes en distintos regímenes (del clásico al cuántico), brindando así una oportunidad óptima para estudiar experimentalmente los problemas conceptuales asociados al tránsito entre mecánica clásica y mecánica cuántica.

Bibliografía complementaria

INTRODUCTION TO SUPERCONDUCTIVITY. M. Tinkham (2ª edición). McGraw-Hill, 1996.

DISCRETE BREATHERS IN NONLINEAR LATTICES: EXPERIMENTAL DETECTION IN A JOSEPHSON ARRAY. E. Trías, J. J. Mazo y T. P. Orlando, en *Physical Review Letters*, n.º 84, págs. 741-744; 2000.

OBSERVATION OF BREATHERS IN JOSEPHSON LADDERS. P. Binder, D. Abraimov, A. V. Ustinov, S. Flach e Y. Zolotaryuk, en *Physical Review Letters*, n.º 84, págs. 745-748; 2000.

¿Obra de arte auténtica o genial falsificación?

Para los propios historiadores del arte expertos en el análisis estilístico resulta difícil determinar si un preciado esmalte pintado data realmente del Renacimiento o se realizó en un taller del siglo XIX. El análisis de su composición química aporta información adicional más objetiva

Heike Bronk e Irmgard Müsch

Hasta los más versados conocedores del arte incurren en embarazosas equivocaciones. Cuando en 1880 el barón Alphonse de Rothschild, apasionado coleccionista, exhibió ante su círculo de amistades un altar del siglo XVI que acababa de adquirir, una de ellas se lo llevó aparte y le aseguró que aquel altar ornamentado con maravillosos esmaltes de vivos colores, que el resto de los invitados seguía admirando en ese mismo momento, no era más que una excelente copia cuyo original se encontraba en Italia. Rothschild denunció a quien se lo había proporcionado; el proceso destapó la estafa: el anticuario encargado de la restauración del original había aprovechado la ocasión para realizar una copia, tan desvergonzada como mañosa.

No se trata, ni mucho menos, de un caso aislado, como ya explicara en 1885 el escritor Paul Eudel en su libro *Las artes de los falsificadores*. Hoy en día casi nadie se atreve a asegurar cuántos de los esmaltes pintados de colecciones privadas o públicas proceden realmente de la ciudad francesa de Limoges, centro de esta técnica durante el Renacimiento, y cuántos se pergeñaron en el siglo XIX, época en que hubo un verdadero auge de los esmaltes. Y es que los artesanos casi nunca firmaban sus obras, ni se molestaban en elaborar una manera personal que facilitaría las atribuciones a artistas concretos. Se consideraban meros artesanos que reproducían con gran habilidad en esmalte las xilografías y aguafuertes de su época.

Al igual que ocurre con otras técnicas artísticas, apenas si se conservan referencias escritas del siglo XVI. Los conocimientos se transmitían de padres a hijos, que garantizaban así su sustento, de por sí seguro en el caso de los esmaltadores de Limoges gracias a los privilegios reales de que gozaban. Se sabe de al menos dos familias que continuaron su labor hasta finales del XVII, y todavía en el XVIII, y conservaron los conocimientos de su arte. A ellas se remitieron los esmaltadores del siglo XIX para reconstruir el proceso.

Las fábricas de vidrio les proporcionaban los materiales adecuados para la aplicación del color. Allí se mezclaba arena o cuarzo con fundentes alcalinos como la sosa y el carbonato o nitrato potásico. A continuación se fundía esta masa hasta convertirla en un “fluido” transparente. Los colores deseados se obtenían con óxidos de diversos metales: los de hierro y cobre se empleaban para conseguir verdes, pardoamarillentos y rojos; los de cobalto, azules; un mineral de la región rico en manganeso, para los tonos violetas, marrones y negros (tonalidades en las que los vidrieros eran auténticos expertos); la agregación de óxido de plomo y óxido de estaño al fluido transparente daba lugar al blanco. Una vez en el taller, se procedía a moler y lavar estos esmaltes “crudos”, sobre todo con agua o ligantes oleosos, hasta obtener una pasta.

Los soportes de cobre se dilatan más con el calor que el vidrio, y cuando se enfrían también se contraen más. Esto genera tensiones mecánicas que pueden provocar fisu-

Las autoras

HEIKE BRONK desarrolla procedimientos espectrométricos aplicados a las obras de arte en el Instituto de Química Inorgánica de la Universidad Técnica de Berlín. La historiadora del arte IRMGARD MÜSCH prepara un catálogo sobre los esmaltes pintados del Museo Herzog Anton Ulrich de Brunswick.



1. COPIAS EN VIDRIO Y COBRE. Los esmaltadores de Limoges se consideraban antes artesanos que artistas. En lugar de dar forma a representaciones propias, se inspiraban en motivos conocidos. Cuando el rey Francisco I (1494-1547) contrató a pintores y estucadores de la escuela del famoso pintor y arquitecto Rafael (1483-1520) para el palacio de Fontainebleau, sus obras pronto sirvieron de prototipo para los esmaltadores. El grabado (*derecha*) para la versión aquí reproducida de "El juicio de Paris" de Rafael fue realizado por Marcantonio Raimondi. La historia del príncipe troyano que debe escoger a la más bella de entre tres diosas y ofrece a Afrodita la manzana, símbolo de su triunfo, gozaba de gran popularidad entre los esmaltadores. El motivo representado no justifica su origen renacentista: los falsificadores utilizaban los mismos modelos.

2. DEL ESMALTE ALVEOLAR al esmalte pintado. La fundición de la masa de vidrio coloreada sobre una base metálica es una técnica que ya se conocía en la antigua Roma. En la Edad Media esta arte decorativa vivió un especial apogeo. Primero se ornamentaron con esmaltes alveolares objetos de culto: se realizaban incisiones en una placa de cobre y se rellenaban con la pasta de vidrio. En el Renacimiento se consiguió pintar directamente con polvo de vidrio mezclado sobre soporte metálico. A finales del siglo XV la ciudad francesa de Limoges, hoy capital de la región del Lemosín, se convirtió en el centro principal de la nueva técnica. Los esmaltadores plasmaban en vivos colores escenas religiosas por encargo del clero. Parece que el "Prendimiento de Cristo", representación de casi 22 × 18 centímetros, proviene de la escuela de Jean I. Pénicaud. La colocación de una costosa lámina de plata bajo el esmalte aumentaba el efecto luminoso.



ras en el esmalte o que incluso llegan a romperlo. Para evitarlo se cocía en el reverso de la base metálica un contraesmalte que limitaba la deformación del metal. A partir de ese momento el esmaltador daba forma al anverso aplicando las pastas con agujas, espátulas o cañas de pluma, variando el grosor de las capas de color o raspando los contornos. Se requerían entre tres y cinco fases de trabajo; cada una de ellas concluía con una cocción de unos dos minutos de duración a temperaturas que oscilaban entre los 760 y los 850 ºC sin que el esmaltador tuviera posibilidad alguna de control sobre el desarrollo de las mismas. Antes de la última cocción, a pincel, se procedía a decorar, con oro por ejemplo.

El esmaltador podía plasmar los dibujos en blanco sobre un fondo azul marino o negro, de forma que, en función del grosor de la capa de blanco empleada, el dibujo reluciese en tonos grisáceos; ésta era la técnica conocida como grisalla. Las partes de color carne se pintaban finalmente con óxido de hierro, de coloración rojiza.

El análisis de los rasgos estilísticos y del procedimiento técnico del esmaltado ha permitido a los historiadores del arte determinar las características distintivas del Renacimiento y, sobre esta base, asignar piezas individuales o partes de ellas a épocas posteriores. Se sabe que el color rojo se aplicaba con poca frecuencia en los esmaltes del Renacimiento. La sustancia empleada en esa época para su obtención adquiría con el calor un ligero tono marrón. A pesar de todo, a menudo no bastan datos como éstos para que el juicio sea inequívoco. En tales casos, la aplicación de métodos científicos resulta prometedora.

Hasta ahora, no existe ningún proceso que permita fechar directamente los materiales empleados, metal y vidrio, a diferencia de lo que ocurre, gracias al método del radiocarbono, con las materias orgánicas. A pesar de todo, el análisis espectroscópico comparativo entre los objetos de referencia y los de origen dudoso aporta información sustancial. Para ello, el científico debe tener conocimientos de las técnicas empleadas en cada época. Hasta el siglo XIX no se emplearían sobre todo el cromo y el uranio para obtener tonos verdosos y amarillos o grisáceos, respectivamente. Asimismo, la utilización del tetraborato sódico (bórax) como fundente se empezó a difundir sólo en tiempos recientes, dado que anteriormente tenía que ser importado desde el Tíbet. El elevado precio limitaba su adquisición en grandes cantidades. Hasta el siglo XVIII, se recurrió al óxido de estaño para lograr esmaltes opacos; sólo más tarde se empezó a utilizar también el arseniato de plomo. De modo que la presencia de determinados elementos en el esmalte permite su adscripción a una época concreta.

Otro tanto sucede con los elementos secundarios o presentes en cantidades de traza, como el fós-



3. EL ESMALTE DE LIMOGES SE PONE DE MODA. Sólo a partir de 1530 se utilizaron motivos mundanos en los esmaltes pintados de Limoges. Sobre estas líneas se representa la historia "Amor y Psique", del escritor romano Apuleyo. La bella Psique tuvo que pasar incontables aventuras por imposición de la envidiosa Venus antes de llegar al Olimpo y conquistar el corazón del dios Amor y la inmortalidad. El paso de las imágenes religiosas a las historias artísticas refleja el cambio de función de los esmaltes pintados al convertirse en parte de la cultura de la corte. Las jarras y bandejas constituían durante los banquetes un deleite también para la vista y servían al mismo tiempo como motivo de conversación en la mesa. Los reyes de Francia Francisco I y Enrique II (1519-1559) concedieron a algunas familias de Limoges el derecho exclusivo de la creación de esmaltes. De entre las mismas nombraron a dos esmaltadores, Léonard Limosin y Pierre Courteys, artistas de la corte. Empezó a ser habitual incluir en las piezas una firma o iniciales grabadas, pero con el carácter, seguramente, de un distintivo de marca. En el siglo XIX se añadían o falsificaban este tipo de firmas.

4. LOS AÑOS OSCUROS. Alrededor de 1650 las artes decorativas limosinas empezaron a sufrir una dura competencia. La clientela pasó a preferir los cuadros en miniatura pintados con óxidos de metal sobre una base esmaltada. Un ejemplo lo constituye el retrato en miniatura del rey Luis XIV (1638-1715) realizado por Jean Petitot (1607-1691) (esmalte sobre base de oro). Otros rivales fueron la porcelana china y la orfebrería. Cada vez eran más los artesanos que se decantaban por la pintura sobre porcelana. Se desconoce qué fue de la mayoría de las obras ya existentes. El duque Anton Ulrich de Brunswick poseía unas doscientas piezas que hoy en día se encuentran en el museo que lleva su nombre. También el duque Augusto de Sajonia adquirió hacia 1700 numerosas piezas. Durante la Revolución Francesa (1789-1799) se volvieron a comerciar muchas piezas que fueron propiedad de la nobleza y del clero. Gracias al creciente interés en la propia historia nacional se empezaron a apreciar las obras antiguas y en 1791 se expusieron por primera vez en un museo, el Musée des Monuments Français, en París.

foro, el cloro, el bario y el rubidio. Se trata de impurezas existentes en las materias primas y que aparecen mucho más en las obras del Renacimiento que en las posteriores. A lo largo de los siglos, gracias al progreso de los conocimientos químicos, se obtuvieron sustancias más puras a partir de las materias primas, tanto para el vidrio como para los colorantes, y se consiguió un proceso de fabricación menos sujeto a variaciones. El cobalto, empleado como colorante azul, procedía de minerales que contenían tanto arseniuro de cobalto como níquel y bismuto. En el siglo XVI el mineral se trataba por tostación, que no eliminaba los residuos. En el XIX se consiguió obtener óxido de cobalto puro mediante procesos químicos. La ausencia de tales impurezas no es por sí misma determinante para la datación. En la fabricación de un esmalte se requiere muy poca cantidad de un material determinado; se sabe que los materiales de un esmaltador pasaban a sus discípulos. Aun así, la suma de estas informaciones complementa el estudio estilístico.

En lo que respecta a los métodos de análisis, se debe evitar que valiosas piezas únicas sufran algún daño en la realización de las pruebas, siquiera sea para la obtención de muestras. Es necesario un procedimiento de análisis que no afecte a la integridad de la obra. Por otro lado, el transporte a un laboratorio externo al museo donde se exponga la pieza sería arriesgado y costoso. El Instituto para la Construcción de Aparatos Berlín-Adlershof y el Instituto de Química de la Universidad Técnica de Berlín desarrollaron, en el marco de un proyecto de colaboración con el Instituto Federal de Investigación de Materiales y la empresa Intax, un espectrómetro portátil. El fundamento es el microanálisis por fluorometría con rayos X. Este procedimiento permite analizar la composición elemental de una sustancia dada. La financiación del proyecto fue asumida por la Fundación de la Baja Sajonia y el Ministerio Federal de Educación e Investigación.

Los fotones del haz de rayos X arrancan electrones de la corteza electrónica de los átomos irradiados. Otros electrones de la corteza ocupan el hueco dejado por los primeros. Caen de niveles de energía mayores. Ese excedente se emite como luz fluorescente; dada su elevada energía, la emisión es de nuevo en forma de rayos X. Los elementos químicos se diferencian entre sí por la estructura de su corteza de electrones; se puede, pues, leer el espectro energético emitido como si de una huella dactilar se tratara. Cuando se irradia una parte de un esmalte se superponen todos los espectros individuales hasta formar un cuadro de conjunto en el que cada uno de los elementos aporta energías características. A partir de la intensidad de la energía liberada puede determinarse incluso la proporción de un elemento en la muestra.

Por lo normal, los análisis espectroscópicos se practican en laboratorios especiales; en ocasiones es necesario el anillo de almacenamiento de un sincrotrón, acelerador de electrones que genera una radiación muy intensa. El microanálisis por fluorometría de rayos X exige menos recursos. El haz de rayos se dirige sobre un área de 80 a 100 micrometros (milésimas de milímetros) de diámetro. Allí se consigue la intensidad necesaria, aunque la potencia de los tubos del aparato de rayos X sea la de los utilizados habitualmente en una consulta de dentista. Otra ventaja de la focalización es que el haz puede también dirigirse a diminutas partículas de color. Finalmente, tampoco es necesario el recurso habitual de la cámara de vacío. El barrido con helio elimina las moléculas de aire que de otra forma absorberían la radiación fluorescente.

Para la concentración de los rayos X se necesitan, de todas maneras, lentes especiales. Desde los años ochenta, los físicos utilizan para este fin capilares de vidrio: el aire y el vacío son para los rayos X más densos ópticamente que el vidrio, al contrario de lo que sucede



5. UN RENACIMIENTO del Renacimiento. Gracias a las ferias y exposiciones de artes decorativas y a las exposiciones universales de París y Londres de mediados del siglo XIX, el esmalte pintado gozó de un nuevo auge. La creciente demanda, y con ella el aumento de los precios, animó a los esmaltadores y anticuarios a restaurar piezas dañadas o añadir detalles. La tradición de las familias artesanas de Limoges, nunca del todo extinguida, volvió a florecer. En la fábrica de cerámica de Sèvres, cerca de París, se abrió en 1845 un taller dedicado a la producción de esmaltes. Las copias realizadas a partir de originales, que más tarde quizá se clasificaron erróneamente como obras del Renacimiento, pasaron por buenas incluso en colecciones y museos. El microanálisis por fluorometría de rayos X ayuda a distinguir entre obra original y copia. Así, el retrato en esmalte expuesto junto a estas líneas es un trabajo excelente y se corresponde con el estilo renacentista, pero la composición química obtenida por el análisis espectroscópico hace pensar más bien en una fecha de creación posterior.

con la luz visible. En uno de estos tubos de vidrio huecos las ondas sufren reflexión total. Las guías de ondas que se utilizan en las redes de fibra de vidrio de telecomunicaciones se basan también en la reflexión total, pero en ellas se emplean fibras de vidrio o plásticas recubiertas por un material ópticamente más delgado. Cientos de miles de tales capilares dan lugar a una lente con estructura de panal, que no sólo guía los haces de rayos X, sino que además los concentra en una geometría de cigarro puro.

El aparato desarrollado al efecto se puede montar en muy poco tiempo en una dependencia de cualquier museo. Una lámina de plomo de pocos centímetros protege al investigador de la radiación durante las mediciones. El prototipo detecta hasta veinte microgramos de un elemento por gramo de prueba, una proporción sobre el peso de aproximadamente dos por diez mil. Desde diciembre de 2000 el sistema está en funcionamiento. Hemos analizado en total ciento veinte esmaltes de las más importantes colecciones alemanas. Poco a poco, los resultados empiezan a dibujar un cuadro de conjunto, a la par que se ha obtenido una amplia base de datos sobre los materiales empleados en las distintas épocas que servirá de referencia en investigaciones posteriores. Durante este proceso se han descubierto algunas falsificaciones, mientras que en otros casos las dudas que despierta el estilo no se han podido confirmar. Además, parece aconsejable reconsiderar la adscripción de muchos esmaltes a determinados talleres.

Ahora la empresa berlinesa Intax produce el espectrómetro en serie, lo que amplía el círculo de los posibles usuarios. Los esmaltes de procedencia dudosa de colecciones públicas y privadas se podrán datar con mayor fiabilidad, aunque sea sólo para confirmar su sitio en la historia del arte y descartar la sospecha de que se trate de falsificaciones. Los expertos albergan la esperanza de poder determinar con los análisis los usos de los talleres mejor que hasta la fecha. Finalmente, tanto en los esmaltes, como en pinturas, objetos de vidrio o de metal, los rayos X sirven para revelar la composición de cualquier compuesto inorgánico.

Bibliografía complementaria

EMAILMALEREI. Alfred Walz, en *Kunst und Antiquitäten*, n.º 4, pág. 26; 1990.

MALEREMAILS AUS LIMOGES - DER BESTAND DES BERLINER KUNSTGEWERBEMUSEUMS. Susanne Netzer, Staatliche Museen zu Berlin und G+H Verlag, Berlín, 1999.

MICROSCOPIC X-RAY FLUORESCENCE ANALYSIS. Dirigido por K. H. A. Janssens et al. Wiley, 2000.

Curiosidades de la física

Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Cuándo se hielan los lagos

En nuestras latitudes, no son raras las temperaturas negativas. Ahora bien, cuando se presentan el hielo y las heladas, no se congelan los lagos y los ríos. En cuanto al mar, ¿quién lo ha visto ya helarse en nuestras costas? Las propiedades del agua en las proximidades de 0 ºC explican tan asombrosa paradoja.

La congelación de un líquido puro se produce a una temperatura exacta, 0 ºC para el agua pura a una atmósfera, o sea, a la presión que reina en la superficie de nuestro planeta. Sin embargo, el fenómeno de la congelación posee una propiedad adicional, que el comportamiento de una mezcla de hielo y agua nos ilustra: añadiéndole o extrayéndole calor, su temperatura sigue constante e igual a 0 ºC, y sólo varía la cantidad de hielo presente. En cambio, a otras temperaturas, el agua se calienta cuando se le aporta calor o se enfría cuando se le extrae. Aportando 4,2 kilojoule a un litro de agua, su temperatura se eleva un grado. Hasta mediado el siglo XVIII se desconoció la meseta de la temperatura de congelación. Se creía que bastaba calentar un poco un cuerpo sólido en su punto de fusión para que, al aumentar algo su temperatura, se licuara del todo; el escocés Joseph Black demostró, hacia 1760, que no había tal cosa.

Cuando hace calor, la existencia de esa meseta de temperatura en el punto de congelación es muy útil: basta poner un cuerpo en contacto con hielo para mantener su temperatura a 0 ºC. Al revés, la meseta de congelación nos protege del frío: cuando querían evitar que los alimentos se helasen, los antiguos disponían grandes baldes de agua. Mientras su contenido no se hubiera transformado en hielo, la temperatura de la bodega no descendía por debajo de 0 ºC.



1. La capa de hielo que en invierno cubre los lagos de agua dulce reduce los intercambios de calor. El hielo aísla el agua lacustre, cuya temperatura permanece superior a 0 ºC

Si es posible estabilizar así la temperatura de una bodega, es que la formación del hielo posee un enorme “poder calentador”. Recíprocamente, la energía a suministrar para que se funda el hielo es muy considerable. Hacen falta 334 kilojoule para transformar un kilogramo de hielo en agua líquida. Este “calor latente de fusión” ¡es 80 veces mayor que los 4,2 kilojoule necesarios para que pase luego ese mismo kilogramo (litro) de agua de 0 ºC a 1 ºC! El elevado valor del calor latente explica por qué la fusión de un cubito de hielo de tres centímetros de arista (unos 25 gramos) basta para rebajar la temperatura de un vaso grande de soda (0,33 litros) de 20 ºC a 12 ºC. En cambio, si se añaden 25 gramos (mililitros) de agua a 0 ºC al mismo vaso, su temperatura sólo bajará 1,5 ºC. Entendemos así de dónde procede el “poder calentador” del balde de agua en la bodega: al helarse, los diez litros de agua que contiene desprenden tanto calor como un radiador de un kilowatt durante una hora.

Las heladas de las aguas dulces

El agua tiene uno de los calores latentes mayores que existen. ¿Por qué? Durante la formación del hielo, las moléculas de H_2O se inmovilizan y se ordenan muy regularmente. En la estructura cristalina formada, los átomos de hidrógeno de cada molécula apuntan hacia el átomo de oxígeno de una molécula vecina. Entre las moléculas se forman así “puentes”. Estos enlaces de hidrógeno explican no sólo el valor excepcional del calor latente del hielo, sino también su resistencia mecánica. Como son bastante largos, mantienen muy separadas las moléculas del agua; por eso ocupan éstas un volumen mayor en estado sólido. Menos denso que el agua, el hielo flota. Cuando éste se funde, se rompe el 16 por ciento de los enlaces de hidrógeno. En virtud de ese hecho, por encima de 0 ºC la densidad del agua crece con la temperatura porque cada vez se rompen más enlaces de hidrógeno. El fenómeno prosigue hasta que el crecimiento del volumen debido a la agitación térmica contrarresta la densificación del agua debida a la destrucción de los enlaces hidrógeno. Así, la densidad del agua líquida pasa por un máximo a 4 ºC.

Sin ese pico de densidad a 4 ºC, las aguas estancadas se helarían de un modo radicalmente distinto. En un lago, la superficie del agua se enfría por radiación y cediendo calor al aire del ambiente por conducción. El primer proceso es sobre todo eficaz en las noches claras, pues la radiación térmica emitida por la Tierra (y sus lagos) se pierde entonces en el espacio. Tomemos el ejemplo de un lago cuya temperatura sea de 10 ºC antes de que la temperatura exterior caiga por debajo de 0 ºC. El agua de la superficie se va enfriando; la

densidad aumenta a medida que su temperatura se acerca a 4 ºC. Más densa que las capas inferiores, el agua de la superficie es arrastrada hacia el fondo; la reemplaza el agua más caliente, y por tanto más ligera, de las profundidades. Ese fenómeno de convección iguala la temperatura en toda el agua. Así, mientras permanezca superior a 4 ºC la masa entera del lago se enfriará, y el proceso durará tanto más cuanto más profundo sea. Ello explica que los charcos y charcas se hielen mucho antes de que aparezca hielo en una laguna.

¿Cuándo aparece ese hielo? En cuanto la temperatura del agua alcanza 4 ºC, su enfriamiento se acelera. Entonces, el agua de la superficie es menos densa que la profunda y se queda arriba, donde se enfría hasta 0 ºC antes de helarse. El hielo de la superficie que aparece en ese momento, muy fino al principio, se va engrosando mientras el resto del agua, la mayor parte del lago, permanece a 0 ºC. Sin ese mecanismo, la vida acuática no podría conservarse en invierno.

Una vez recubierto de hielo un lago, hace falta, para que siga helándose, que el enorme calor producido por el agua al congelarse se evacue a través de la capa de hielo. Cuanto más gruesa es ésta, más lento es el proceso. Conforme crece el hielo, el crecimiento se modera. A temperatura constante de la superficie, la velocidad de formación de una capa de hielo es inversamente proporcional a su espesor, que es, a su vez, proporcional a la raíz cuadrada del tiempo que haya tardado en formarse. Si una noche a –18 ºC produce cinco centímetros de hielo en la superficie de un lago, harán falta 100 noches sucesivas en las mismas condiciones para que el espesor llegue a 50 centímetros. Sólo se dan circunstancias así en el Gran Norte. El lago Baikal, en Siberia, sufre temperaturas exteriores cercanas a –30 ºC durante muchos meses. Muy profundo (hasta 1600 metros), es famoso por las numerosas especies de peces que alberga: como los osos, los peces y las algas siberianas esperan a la primavera en una "caverna" de hielo, al abrigo de la helada.

En nuestro clima, la helada sólo puede ser superficial. Una masa de agua se hiela por completo si es somera. Esta idea se aplicaba antaño para construir estanques de congelación, donde se producía el hielo que luego se almacenaba en neveras durante el invierno. El estanque del glaciar Pivaut (recientemente restaurado), en el macizo de Sainte-Baume, cerca de Aix-en-Provence, medía 5000 metros cuadrados, pero su profundidad era sólo de 20 centímetros.

Pese a su delgadez, sorprende la resistencia del hielo que cubre los lagos. En Canadá, los paseos con motonieves por las superficies lacustres son una diversión corriente: los canadienses aprovechan la resistencia del hielo para construir pasos para ellas sobre los ríos. Como el crecimiento natural del hielo resultaría demasiado lento para crear una capa espesa, ayudan a la naturaleza depositando cada tarde una capa de agua bastante delgada. Se hiela en una noche; consiguen el grosor deseado en varios días. La solidez de una capa de hielo aumenta muy deprisa con su espesor: el peso que soporta es proporcional al cuadrado de éste. Para aguantar un adulto bastan cinco centímetros: 15 soportan un coche, 30 un camión. Sin



2. Cuanto más salina sea un agua, tanto más inferior a 0 ºC será su punto de congelación. El colegial saca provecho de esa característica para abrirse un pasillo sin hielo camino de la escuela

embargo, la prudencia se impone antes de aventurarse sobre una capa de hielo. Pese a su bella apariencia, podría haber puntos donde fuera frágil; el espesor quizá no sea uniforme.

Cuándo se hiela el mar

¿Y el mar? ¿Por qué, incluso en Siberia, sigue danzando en los golfos despejados? Respuesta: por la sal. La salinidad rebaja el punto de congelación del agua marina varios grados respecto al del agua dulce. De ahí la idea de esparcir sal para evitar la formación de hielo en las calzadas. Cuanto mayor es la concentración de sal en el agua, más disminuye el punto de congelación. Así, en el golfo del San Lorenzo, en Quebec, el agua contiene 35 gramos de sal por litro y no se hiela hasta –2 ºC.

Nuestras abuelas aprovechaban para hacer sorbetes la disminución del punto de congelación del agua salada. Para obtener un baño térmico a temperatura negativa (–4 ºC) mezclaban en un recipiente sal gruesa con hielo a 0 ºC. En contacto con la sal, el hielo se fundía, absorbiendo calor, proceso que rebajaba por debajo de 0 ºC la temperatura de la mezcla. Esa temperatura se estabilizaba a la de congelación del agua salada; se mantenía mientras quedase hielo en el recipiente. Entonces introducían la sorbetera en el baño líquido obtenido.

El agua salada se densifica también a medida que su temperatura se acerca al punto de congelación; se hunde por ello. No es fácil, pues, que una capa de agua fría se estabilice en la superficie del mar; la convección se opone a ello. Para que se hiele la superficie del mar, hace falta primero que su "volumen completo" se enfríe hasta llegar al punto de congelación. En la realidad, el "volumen completo" se limita a varias decenas de metros de profundidad, pues la densidad, a causa de la salinidad, crece con la profundidad: aunque sean más cálidas, las capas profundas cargadas de sal resultan más densas y se quedan en el fondo. La diferencia entre las congelaciones de las aguas dulces y saladas se observa perfectamente en el San Lorenzo: el estuario del río canadiense está lleno de hielo desde diciembre, la bahía no se carga de hielo hasta febrero.

JUEGOS MATEMÁTICOS

Juan M. R. Parrondo

Juegos equitativos con dados y monedas trucadas

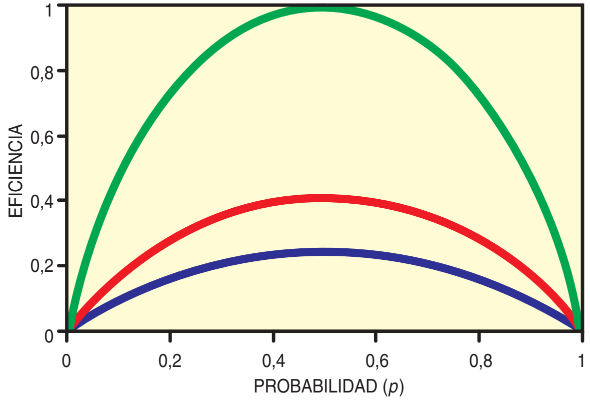
En abril propuse a los lectores el siguiente problema: ¿Es posible diseñar un juego de azar equitativo utilizando una moneda trucada, aun sin conocer las probabilidades de que salga cara o cruz al lanzarla? Von Neumann enunció este problema en 1957, dando una solución que ya era conocida popularmente y que me han hecho llegar varios lectores. Lanzamos dos veces la moneda: si sale cara-cruz, entonces gana un jugador; si sale cruz-cara, gana el otro; finalmente, si sale cara-cara o cruz-cruz se repite el doble lanzamiento. Las dos posibilidades cara-cruz y cruz-cara son evidentemente simétricas y por tanto tienen la misma probabilidad de ocurrir, se haya trucado como se haya trucado la moneda.

Von Neumann enunció el problema relacionándolo con la generación de *bits* sin sesgo. Recordemos que un *bit* puede tomar sólo dos valores, 0 y 1. Una moneda se puede considerar como un generador de bits si asociamos, por ejemplo, un 0 a cara y un 1 a cruz. Si la moneda está trucada, es decir, si la probabilidad de que salga cara es p, siendo p distinto de 1/2, entonces los bits generados tendrán un cierto sesgo: la fracción de unos en la serie generada por la moneda será aproximadamente igual a p si la lanzamos un número muy grande de veces. Conseguir un juego equitativo a partir de una moneda trucada es equivalente al de conseguir bits sin sesgo a partir de bits sesgados.

La solución expuesta, aunque correcta, es bastante ineficiente. Supongamos que lanzamos la moneda $2N$ veces (recordemos que el número de lanzamientos ha de ser par). ¿Cuántos bits sin sesgo conseguiremos, en media? De cada par de tiradas, obtenemos un bit sin sesgar sólo si el resultado es cara-cruz o cruz-cara. La probabilidad de cada uno de estos resultados es $p(1-p)$ y la probabilidad de que aparezca uno u otro es $2p(1-p)$. Por tanto, el número medio de bits sin sesgo que obtendremos después de $2N$ tiradas será $N_{bits} = N[2p(1-p)]$. Podemos definir la "eficiencia", E, del método como el número de bits sin sesgar que conseguimos en media por cada lanzamiento de moneda, es decir:

$$E = \frac{N_{bits}}{2N} = p(1-p).$$

La curva azul de la figura 1 representa esta eficiencia, que es muy baja cuando p se acerca a cero o a uno. La razón es que, cuando la moneda está tan cargada que apenas sale cruz, será muy difícil conseguir bits que no estén sesgados: no se puede obtener incertidumbre a partir de algo que es casi determinista. Parece como si hubiera una "ley de conservación de la incertidumbre", parecida a la ley de la conservación de la energía. De hecho, la formulación matemática de esta ley constituye una de las bases de la teoría de la información de Claude Shannon, a la que hemos dedicado ya algunos artículos (véanse los *Juegos Matemáticos* de agosto y septiembre de 2001). Más que de una ley de conservación de la incertidumbre, se trata de una ley de conservación de la información, ya que información e incertidumbre son equivalentes en la teoría de Shannon.



1. La eficiencia del método de las parejas (en azul) *y del método de los grupos de cuatro* (en rojo). *En verde se puede ver la eficiencia máxima dada por la teoría de la información*

Aunque parezca una perogrullada, una serie de, digamos, 1000 bits sin sesgo contiene 1000 bits de información; una de 1000 bits sesgados, en cambio, contendrá menos. Un ejemplo límite sería una serie en donde todos los bits fuesen iguales a cero o a uno, cuyo contenido informativo es prácticamente nulo. Shannon encontró la siguiente fórmula para calcular la información contenida en N bits sesgados, donde el uno aparece con probabilidad p y el cero con probabilidad $1-p$:

$$I = -N\,[\,p\log_2 p + (1-p)\log_2(1-p)].$$

Según esta fórmula, la información es nula si p es cero o uno, es decir, si en la serie no hay incertidumbre alguna, mientras que es máxima si p es 1/2, caso en que la información es igual al tamaño N de la serie.

¿Cómo se aplica la teoría de la información al problema de la generación de bits sin sesgo con la moneda trucada? Nuestra moneda genera una serie de bits con un contenido informativo dado por la fórmula de Shannon. Por otro lado, una simple manipulación de la serie no puede crear nueva información. Por tanto, con N tiradas de la moneda podremos obtener, como máximo, I bits aleatorios. Tenemos por tanto un valor máximo para la eficiencia:

$$E_{max} = \frac{I}{N} = -[\,p\log_2 p + (1-p)\log_2(1-p)].$$

Este valor es un límite superior que ningún método, por eficiente

que sea, podría superar. Nuestro principio de conservación se parece más ahora a la segunda ley de la termodinámica que a la conservación de la energía: manipulando de modo determinista una serie de datos es imposible aumentar la cantidad de información que contiene.

En la figura 1 se puede ver el valor máximo de la eficiencia en función de *p*. La eficiencia del método que hemos expuesto al principio del articulo está muy por debajo de la máxima. Por eso decíamos antes que el método es bastante ineficiente. Esto es más evidente en el caso en que *p* es 1/2. Nuestro método rechaza la mitad de las tiradas y, de las que utiliza, obtiene sólo un bit por cada dos tiradas. De modo que la eficiencia es 1/4. Sin embargo, la moneda genera por sí sola bits sin sesgo, de ahí que la eficiencia máxima sea igual a uno. Claro que la principal virtud del método descrito es que valga para cualquier valor de *p*. ¿Se puede diseñar un método que, siendo independiente de *p*, alcance la eficiencia máxima?

Un método más eficiente —una versión simplificada de una idea que me ha enviado el profesor de la Universidad de Valencia Rafael Pla— utiliza grupos de cuatro tiradas y obtiene con ellos la máxima información posible. El método se resume en la tabla de la derecha, en la que la cara de la moneda se representa por una C y la cruz por una X. Observe que algunos grupos “codifican” dos bits sin sesgo mientras que otros codifican sólo uno. Los grupos en donde aparecen cuatro caras o cuatro cruces se desechan, como en el caso de la generación de bits a partir de parejas. La eficiencia del método está todavía lejos de la máxima, como se puede ver en la figura 1, en donde se representa mediante la curva roja. Para alcanzarla, haría falta considerar grupos cada vez más grandes.

BITS SESGADOS	BITS SIN SESGAR	BITS SESGADOS	BITS SIN SESGAR
CCXX	1	CXCC	11
XXCC	0	CCXC	10
CXCX	11	CCCX	01
XCXC	00	CXXX	11
XCCX	01	XCXX	00
CXXC	10	XXCX	01
XCCC	00	XXXC	10

También sobre dados y monedas trucadas, formulaba en abril la siguiente pregunta: ¿es ventajoso jugar al parchís con un dado trucado en el que el seis tenga más probabilidad de salir que la habitual? La respuesta no es fácil, puesto que el seis tiene su parte de cal y de arena: con él avanzamos el mayor número de casillas, pero si sale tres veces consecutivas tenemos que devolver la ficha a casa. En aquel artículo, daba una solución bastante parcial, obtenida mediante un análisis de un parchís muy simplificado. Raquel Alvarez, César Fernández y Armando Relaño, estudiantes de la Universidad Complutense de Madrid, me han enviado una solución más completa. Han simulado un juego de parchís “casi” real. En él hay sólo un jugador que tiene que recorrer, con una única ficha, las 72 casillas que separan la casa de la meta. La ficha avanza según la puntuación de un dado en el que el seis tiene una probabilidad de salir igual a *p* y el resto de los números tienen una probabilidad de salir igual a $(1 - p)/5$. En la simulación, se contabiliza el número total de tiradas necesario para llegar a la meta, teniendo en cuenta las siguientes reglas: cuando sale un seis, además de avanzar la ficha, el jugador vuelve a tirar sin que se contabilice la nueva tirada; si sale un seis tres veces seguidas, la ficha vuelve a casa; para salir de casa es necesario sacar un cinco; finalmente, hay que llegar a la meta con la puntuación exacta, y si la puntuación es superior, entonces la ficha “rebota”.

Con estas reglas, han jugado un millón de veces para cada valor de *p* y calculado el número medio de tiradas necesario para llegar a la meta. El resultado puede verse en la curva azul de la figura 2. He dibujado también en la misma figura el número medio de tiradas que se obtiene con la teoría, más simple, que expuse en el artículo de abril, en la que una ficha avanza la puntuación del dado y retrocede 36 casillas cuando salen tres seises consecutivos. Las dos curvas difieren bastante para valores altos de *p*, debido a que en ese caso reglas como la del cinco para sacar ficha o la de llegada exacta a la meta cobran una mayor importancia y no se tuvieron en cuenta en el cálculo teórico de abril.

2. Número medio de tiradas para alcanzar la meta en el parchís, en función de la probabilidad p *de sacar un seis en el dado. En rojo, la teoría descrita en el artículo de abril de 2001. En azul, la simulación de Raquel Alvarez, César Fernández y Armando Relaño*

Lo curioso es que el mínimo de ambas curvas está cerca de 1/6, es decir, del valor correspondiente a un dado no trucado, como se ve en la ampliación de la gráfica entre 0,1 y 0,2. Esto significa que la regla de volver a casa con tres seises prácticamente neutraliza cualquier ventaja que pudiera surgir al cargar el dado hacia el seis. Es como si, a lo largo de la historia del parchís, cuyos orígenes se remontan a la India, la regla hubiera surgido para que el juego fuera equitativo incluso con dados trucados. Aunque esta afirmación no es del todo cierta, porque un dado en el que el cinco salga con una probabilidad alta sí es claramente ventajoso. Es probable que un parchís más justo sería aquél en el que la ficha saliera de casa cuando se obtuviese un uno en el dado.

Mark Fischetti

Análisis de laboratorio

Dos días de fiebre con tos flemática nos llevan a visitar al médico. Nos examina, nos pregunta, sospecha que hay una infección bacteriana y decide que se necesita un análisis. Nos frota el fondo de la garganta con un largo bastoncillo de algodón, para recoger células infectadas. Lo enviará al laboratorio de un hospital o centro de salud. De haber sospechado de otros agentes patógenos habría recogido muestras de esputos, sangre, orina o heces, y las habría mandado también.

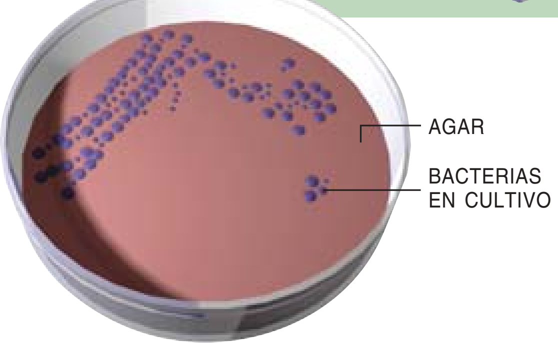
Una laborante desempaqueta la muestra en un banco, bajo una campana que extrae el aire hacia un sistema filtrante. De ese modo, los agentes patógenos no quedan suspendidos en el aire del laboratorio. A partir de ahí, la muestra sufre todo un surtido de pruebas en serie; cada paso acota más la posible identidad del agente patógeno hasta que se determina uno específico. Al tratar con una bacteria, el proceso más corriente es aumentar la cantidad de muestra cultivándola en una placa y someterla a continuación a carbohidratos y antibióticos para juzgar de qué bacteria en concreto se trata y qué fármacos la matarán más eficazmente (*véase la figura*). A los dos días de la visita al médico, tendremos los resultados del análisis.

Los virus son demasiado pequeños para observarlos con el microscopio óptico; deben cultivarse en unas células, en las llamadas líneas celulares. La laborante las examinará de varios modos. Una prueba usual consiste en poner gotas de suero del enfermo (el componente incoloro de nuestra sangre que contiene anticuerpos) en los pocillos de distintos tableros de plástico. Dentro de los pocillos hay antígenos de distintos virus. La laborante sabrá qué virus tenemos observando cuál es el antígeno con el que reaccionan los anticuerpos.

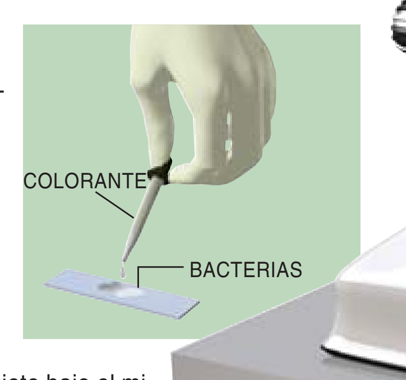
Las pruebas de laboratorio pueden ser complejas y caras, también largas, y ninguna es exacta al cien por cien. Disponer de otras más rápidas ayudaría a las autoridades sanitarias a detener la propagación de las enfermedades infecciosas. “Durante años, no se invirtió en mejorar los análisis clínicos”, afirma Phyllis Della-Latta, directora del laboratorio de microbiología clínica del Centro Médico Presbiteriano, en Columbia, Nueva York. Pero a raíz de los ataques con carbunco, de golpe se han asignado millones de dólares.

***1* CULTIVO**
Una laborante esparce células infectadas de un paciente en una película de agar duro ceroso dentro de una placa de Petri. El agar, hecho de algas, está impregnado de sangre de cordero, que nutre a las bacterias. Luego cierra la tapa y pone la placa a incubar durante 24 horas a 37 grados Celsius (la temperatura corporal); de esa forma las bacterias medran y dan más especímenes para ensayos ulteriores.





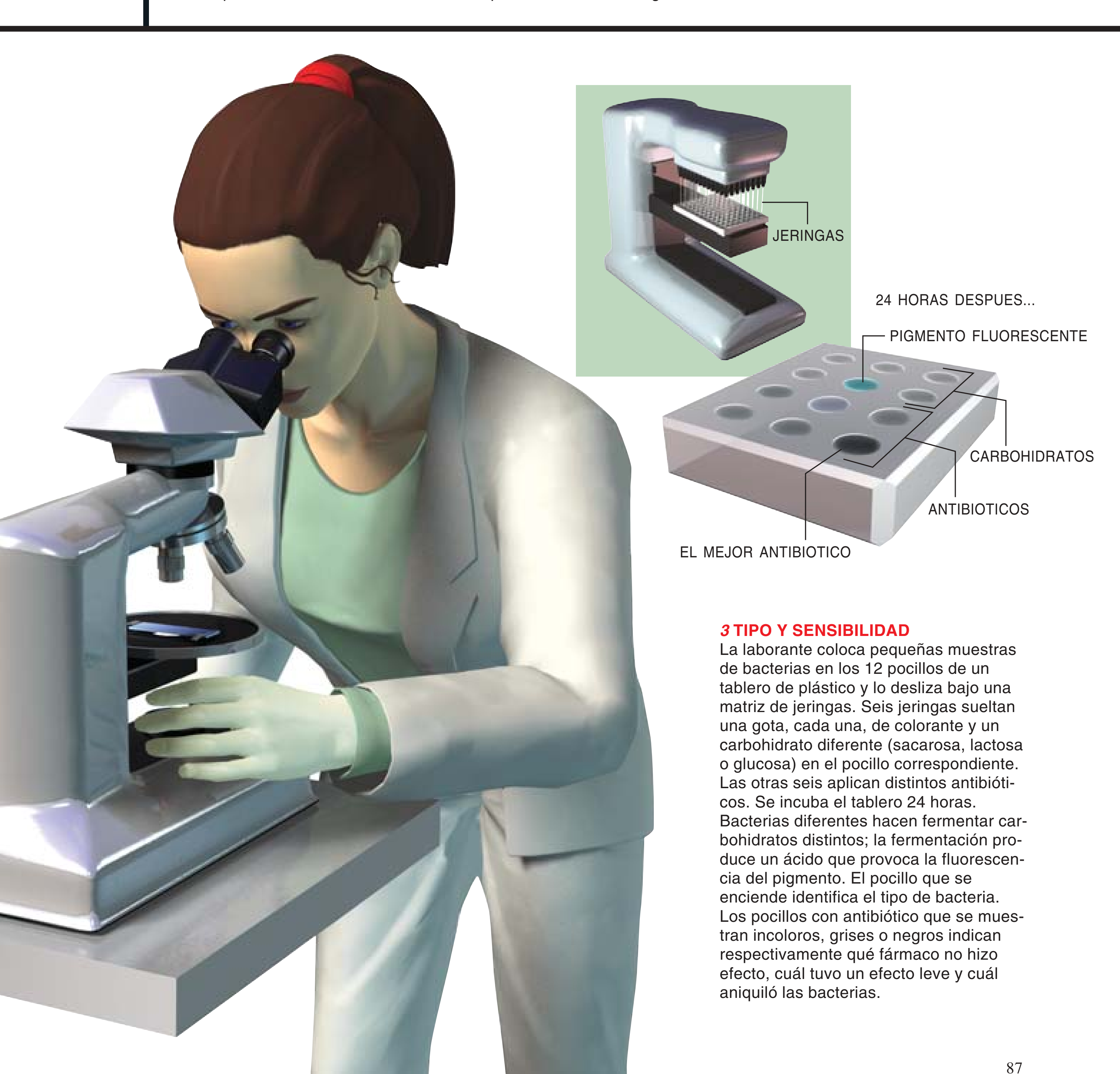
***2* COLORACION**
La laborante unta con las bacterias cultivadas un portaobjeto. Luego lo calienta con una llama para “fijar” en él las bacterias. Seguidamente deposita encima unas pocas gotas de colorante. Algunos organismos, como los estreptococos o los estafilococos, absorben la tintura azul; otros, como *Salmonella* o *Escherichia coli*, la roja. La laborante examina el portaobjeto bajo el microscopio para ver si las bacterias son redondeadas o bastoncillos y si forman racimos o cadenas. Todos esos datos acotan la búsqueda de la identidad del germen.



➤ **CARBUNCO** Ciertos patógenos, como el carbunco, no se revelan bien con las pruebas de laboratorio ordinarias y deben examinarse con unas técnicas muy específicas que sólo pueden costear los laboratorios estatales. Las muestras procedentes de los sobres sospechosos descubiertos durante los ataques con carbunco del otoño pasado fueron remitidas a los Centros de Control y Prevención de Enfermedades de Estados Unidos. Hay patógenos como el ébola tan contagiosos, que únicamente pueden manipularse en laboratorios de "nivel de contención 4", donde los laborantes visten monos cerrados y respiran a través de máscaras.

➤ **TUBERCULOSIS** *Mycabacterium tuberculosis* puede tardar de tres a ocho semanas en desarrollarse en una placa de laboratorio. En el ínterin, un paciente contagioso puede infectar a muchos otros. El Centro Médico Presbiteriano de Columbia es uno de los primeros hospitales que están ensayando una nueva "prueba rápida" de los ácidos nucleicos del germen, capaz de señalar la presencia de tuberculosis en cuatro horas. Tan rápida respuesta facilita que pueda mantenerse en cuarentena al paciente dudoso durante el análisis, si no antes, reduciendo los riesgos de contagio.

➤ **EL VERSATIL AGAR** El agar es un gel que se extrae de una variedad de algas rojas que se da a la altura de Asia oriental y de la costa norteamericana del Pacífico. Constituye el sustrato donde se cultivan las bacterias en las placas de laboratorio. Se emplea también en laxantes, como espesante en las comidas preparadas, como gelatina en la cocina china y como base de algunos dulces.



3 TIPO Y SENSIBILIDAD
La laborante coloca pequeñas muestras de bacterias en los 12 pocillos de un tablero de plástico y lo desliza bajo una matriz de jeringas. Seis jeringas sueltan una gota, cada una, de colorante y un carbohidrato diferente (sacarosa, lactosa o glucosa) en el pocillo correspondiente. Las otras seis aplican distintos antibióticos. Se incuba el tablero 24 horas. Bacterias diferentes hacen fermentar carbohidratos distintos; la fermentación produce un ácido que provoca la fluorescencia del pigmento. El pocillo que se enciende identifica el tipo de bacteria. Los pocillos con antibiótico que se muestran incoloros, grises o negros indican respectivamente qué fármaco no hizo efecto, cuál tuvo un efecto leve y cuál aniquiló las bacterias.

NEXOS

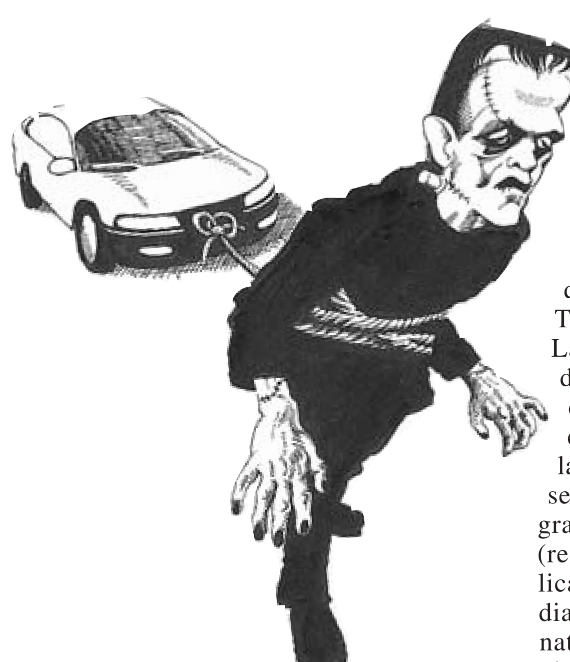
James Burke

Sin combustible

Hace poco, realicé un viaje de placer por Suiza. Mientras contemplaba desde mi coche de alquiler el lago de Ginebra, el vehículo me anunció que me estaba quedando sin gasolina. Tal como están las cosas hoy en día, un coche parlante no me parece un elemento de fantasía científica. Lo divertido del asunto radica en que sucedió mientras pasaba por delante de Villa Deodati, el mismísimo lugar donde otro inglés había inventado ese género literario.

En 1816 Mary Godwin estuvo allí de vacaciones con su amante, el poeta Percy Shelley, con quien se casaría un año después. Se dedicaron a fumar cáñamo y a divertirse a su aire con un nuevo amigo común, Lord Byron, y su acompañante, Claire (de soltera, Jane), hermanastra de Mary. Una noche, durante la sobremesa de la cena hablaron sobre la posibilidad de infundir de nuevo la vida en un cadáver, así como si se podría reconstruir un ser humano a partir de componentes de origen diverso. Y también comentaron el excitante rumor de que Erasmus Darwin había galvanizado eléctricamente unos fideos infundiéndoles vida.

Lo cierto es que esos chalados empezaban a jugar con las fuerzas fundamentales del universo. ¿Adónde podían llevar? Mary acababa de leer un discurso de Humphry Davy sobre química, en el que se consideraba si los científicos llegarían un día a descubrir los secretos de la naturaleza. Tal vez influida por su lectura, decidió escribir un cuento anticipador sobre un suizo apartado del mundo, llamado Víctor, cuyo experimento, en el que mezcla elementos de química, fisiología y electricidad, tiene un resultado desastroso y da vida a un monstruo que Víctor no es capaz de controlar. El lector seguro que habrá contemplado alguna de las numerosas versiones cinematográficas del argumento. Personalmente, prefiero la de Boris Karloff.



Mary heredó de su padre, William Godwin, una perspectiva pesimista de la técnica. Fue su padre uno de los primeros socialistas y santón político de otros izquierdistas como él: Samuel Taylor Coleridge y Charles Lamb. Godwin y la mayoría de sus seguidores románticos despreciaban el nuevo estilo de vida impuesto por la industrialización y sus dioses, las máquinas, que degradaban a los trabajadores (recién llegados de una idílica vida rural) con prácticas diabólicas y contrarias a la naturaleza, entre las que incluían los turnos y los salarios. Godwin llenó mazos de páginas sobre la modelación (deformación, según él) del individuo por el medio. Había que aspirar, proponía, a establecer comunidades descentralizadas, igualitarias y concebidas a escala humana, olvidándose de la producción en masa en urbes gigantescas.

Entre sus seguidores devotos figuraba Robert Owen, quien puso en obra las teorías de Godwin. Owen había trabajado de capataz en una fábrica textil de Manchester. Conocía, pues, el paño de los excesos de los primeros talleres de hilaturas. En 1800 se convirtió en copropietario de la mayor empresa de Escocia, una fábrica movida con energía hidráulica en el pueblo de New Lanark, a orillas del río Clyde. Dos terceras partes de los obreros de los telares eran niños huérfanos. Por extraordinario que hoy parezca, el empleo de los pequeños se consideraba una obra de caridad, porque así se les arrancaba de la miseria y se evitaba que acabaran entre rejas. Cuando Owen y sus socios llegaron a New Lanark, transformaron la nave en un lugar peligrosamente liberal: una vez al mes se cambiaba la paja de las camas de los niños, había dos horas diarias de clase, la ropa se lavaba cada dos semanas y sólo dormían tres niños por cama, setenta y cinco por habitación.

Era una verdadera utopía socialista, con pausas para música y bailes, una institución para la educación de la persona, una tienda y una cantina. (Owen también incrementó la jornada laboral hasta catorce horas.) En 1824 estas ideas tan liberales encontraron buena acogida. Owen lideraba un movimiento obrerista nacional y se codeaba con el Gran Duque Nicolás de Rusia, el reformista Jeremy Benton y el arzobispo de Canterbury,

por citar tres de sus egregios admiradores.

Fue David Dale quien le vendió la propiedad en New Lanark, con cuya hija acabó casándose. Había brillado su suegro en el mundo textil. De sus contados traspiés recordaremos sólo su asociación con George Macintosh en una fábrica de algodón. En 1777 Macintosh desarrolló un tinte escarlata a partir de amoníaco (procedente de la orina de amigos y trabajadores) y liquen (en su mayoría importado, una vez dejó pelados los montes de Europa, de Escandinavia a Cerdeña). El tinte de marras venía a suplir el carmín extraído de la cochinilla, colorante notablemente caro. Además, el tinte de Macintosh se volvía azul en medio alcalino, para volver a su tono violáceo en medio ácido. Los fabricantes de papel lo conocían como tornasol.

Probablemente fue la relación del tinte con el amoníaco lo que llevó al hijo de George, Charles, a relacionarse con las fábricas de gas de Glasgow. Hacia 1819, se las arregló para hacerse, mediante contrato, con toda la brea de carbón, un producto residual de la manufactura del gas, en la que se cocía el carbón para obtener gas. La brea se amontonaba en presas, ríos y estanques. Con esta fétida (y tan barata) materia, Charles destiló amoníaco para la fabricación de su tinte, cuya producción excedía la disponibilidad de urea. También recuperó otra sustancia que cambiaría el significado de los días de lluvia: la nafta, que, como descubriera Charles, disolvía el caucho. En 1822, tras patentar la técnica, esparció caucho líquido entre tramas de algodón e inventó el impermeable. Los ingleses lo llaman todavía mackintosh.

No mucho después de que Macintosh se enriqueciera con la basura, el teutón von Hoffmann defendía su tesis doctoral sobre la brea de carbón. Adquirida así reputación académica, la fétida sustancia fue objeto de otros experimentos. En 1856 uno de los alumnos de von Hoffmann en el Real Colegio de Química de Londres, William Perkin, descubrió el primer tinte artificial de anilina (malva) de la brea de carbón, cuando intentaba en realidad fabricar quinina artificial, pero ésa es otra historia.

Mientras tanto, un colega de von Hoffmann, de apellido Runge, también experimentando con carbón de brea, fabricó creosota y echó así una mano a los amenazados bosques norteamericanos. Con este producto, las traviesas del ferrocarril duraban más; no hubo que reemplazarlas con la frecuencia con que se venía haciendo. La creosota impidió otras talas y podredumbres. Hacia 1857 en Carlisle, una forma de creosota llamada ácido carbólico se mezclaba con las aguas residuales para evitar su descomposición.

Ocho años después, el profesor de cirugía de la Real Enfermería de Edimburgo, Joseph Lister, oyó algo sobre el truco, tomó cierta cantidad del laboratorio de química de la Universidad de Glasgow y lo combinó con parafina. Armado de esta guisa, Lister acometió algo inesperado. Seccionó la piel de un paciente que sufría una fractura compleja, aunque su vida no corría peligro. Cuando apareció la supuración, habitualmente fatal, Lister aplicó su pasta de carbólico y, maravilla de las maravillas, el paciente sobrevivió.

En breve, Lister se dedicó a rociar con un vapor de carbólico los quirófanos, entre otras medidas antisépticas. Lo aplicó incluso a la reina Victoria, que tenía un absceso. Los cirujanos, amigos de las bromas, brincaban al quirófano gritando "Vamos a rociar". Antes, las plegarias eran casi el único recurso para albergar alguna esperanza de éxito en una profesión en la que el otro chiste habitual era: "Excelente operación, si el paciente la hubiera sobrevivido".

Los aerosoles también se popularizaron, así para anestesia como para frascos de perfume. En 1883, un joven ingeniero alemán, Wilhelm Maybach, se asoció con un antiguo armero. Juntos emplearon el aerosol en algo que literalmente cambió la forma en que el mundo funciona. Maybach atomizó la gasolina en un fino aerosol con mejores propiedades de combustión en el interior del cilindro, de forma que podía mover un pistón arriba y abajo. El coche que incorporaba el invento recibiría el nombre de la hija de uno de los inversores principales, por la que el socio de Maybach sentía predilección. El amigo resultó ser Daimler y la chica Mercedes. Y el carburador de Maybach es, imagino, en última instancia responsable de que pudiera conducir junto al lago de Ginebra y de que me quedara sin combustible. Como le acaba de suceder ahora a esta sección.

Libros

Renacimiento

Científico

The Renaissance in Europe. An Anthology. Dirigido por Peter Elmer, Nick Webb y Roberta Wood. Yale University Press; New Haven, 2000. **Immagini per Conoscere. Dal Rinascimento alla Rivoluzione Scientifica.** Edición preparada por Fabrizio Meroi y Claudio Pogliano. Olschki editore; Florencia, 2001.

The Unmaking of the Medieval Christian Cosmos, 1500-1760, por W. G. L. Randles. Ashgate; Aldershot, 1999. **La Contre-Réforme Mathématique,** por Antonella Romano. Ecole Française de Rome; 1999.

Corpus Paracelsisticum. Band I. Der Frühparacelsismus. Edición preparada por Wilhelm Kühlmann y Joachim Telle. Max Niemeyer Verlag; Tübingen, 2001.

Giordano Bruno 1548-1600. Introducción de Eugenio Canone. Leo S. Olschki editore; Florencia, 2000. **Cosmología, Teología y Religión en la Obra y en el Proceso de Giordano Bruno.** Al cuidado de Miguel Angel Granada. Publicacions de la Universitat de Barcelona; Barcelona, 2001.

Si algo unía a los hombres del Renacimiento era el sentimiento de que asistían a una nueva era, conciencia que fue acrisolándose en la medida en que iban apareciendo nuevos medios técnicos capaces de domeñar aspectos importantes de la naturaleza, como el tiempo (reloj) y el espacio (brújula). Distanciamiento que los resúmenes históricos al uso (*The Renaissance in Europe*) convierten en liberación del pasado medieval, a través de la independencia del sujeto, del conocimiento, de la política y la religión. Nueva conciencia nacida, a la postre, de una forma fresca de mirar las cosas (*Immagini per Conoscere*).

Heraldos del nuevo giro, los humanistas del Cuatrocientos gozaron del placer de la lectura directa de los clásicos en un aluvión de manuscritos llegados de Bizancio. Contaron con recursos propios o se ampararon bajo mecenas generosos. Cierto es que no se trataba de un fenómeno inédito en la historia de Europa. De Tesalónica, en el siglo XIII, se había traído Guillermo de Moerbecke importantes textos aristotélicos. Pero, ahora, ni la cantidad ni la calidad, ni la receptividad tenían parangón. A ello algunos sumaron una doble aversión, contra el escolasticismo y contra la mediación árabe de la ciencia.

En el Quinientos, la tendencia innovadora cobra un resuelto impulso en las casas señoriales de Ferrara, Urbino, Mantua y Milán; en la república de Florencia. De donde se irradiarán a otras capitales europeas, eslavas incluidas. Aparece el hombre del Renacimiento, personificado en Leonardo da Vinci, poroso a todo saber e inquieto en lo espiritual. A lo largo del transcurso de la centuria, de Reforma Protestante y Contrarreforma Católica, de acres polémicas y paz imposible, la ciencia avanza sólida con una tenacidad que se diría propia de tiempos tolerantes. No hubo que esperar al siglo de la revolución científica para que se esbozara la teoría heliocéntrica, se ahormara la botánica o se conociera el cuerpo humano.

Se vio favorecido ese movimiento por el impulso de la imprenta, que multiplicó en cifra astronómica la difusión del saber. Junto al texto escrito, la incorporación del dibujo, que exigía precisión y perfiles rigurosos en la ubicación del órgano o en la delineación del limbo foliar. Hasta entonces, las ilustraciones se reproducían de un doble modo: por medio de planchas incisas en metal o por matrices en madera. El refinamiento del artista, digamos de Jan van Calcar, crea la serie espectacular que se ofrece en el *De humani corporis fabrica* de Vesalio. O los grabados del *De historia stirpium* de Leonhart Fuchs, tantas veces reproducidos en obras de distintos autores. Fuchs ha avanzado un paso importante sobre su predecesor Otto Brunfels; él dirige la elaboración de las imágenes. Con todo hay quien no acaba de fiarse del valor científico y pedagógico de la ilustración, como Andrea Cesalpino, que las obvia en su capital *De plantis libri XVI*, el primer tratado sistemático del mundo vegetal, que apareció en 1583.

Se dieron otras paradojas. Al hilo de un Platón recuperado, se destaca que la astronomía realza el sentido de la vista por encima de los demás. Sin embargo, la ilustración astronómica de los tratados geométricos heredada del humanismo adolece de extrema pobreza, en tanto que los manuales y libros generales se esfuerzan por incorporarla como un instrumento indispensable para la comprensión del universo. El *Epitome in Almagestum Ptolomei* de Johannes Regiomontanus, impreso en 1496, se decora con un dibujo geométrico esquemático y decepcionante. Situación que dará un giro al final del siglo XVI con las aportaciones de Tycho Brahe y Kepler; para entonces, se cuenta con poderosos aparatos ópticos que confieren respaldo observacional a las descripciones. Lo mismo que el escalpelo le sirve a Vesalio para acabar con numerosos prejuicios galenistas.

Además de la representación de los cielos importaba la naturaleza de los mismos (*The Unmaking of the Medieval Christian Cosmos).* Randles defiende la tesis de que el mérito del desarrollo de la astronomía renacentista debe atribuirse a los teólogos, no a los científicos. Desde comienzos de la era cristiana y a través de la Edad Media, los teólogos dedicaron un empeño notable a lograr la síntesis entre cos-

mología griega y relato de la creación según el Génesis. Si los Padres de la Iglesia pusieron los cimientos de una racionalización científica de los seis días de la creación, la recuperación de los textos aristotélicos en el Medievo incluyó la idea de quintaesencia en la descripción de una esferas celestes sólidas sobre las que descansarían los planetas y las estrellas fijas. Era un cosmos acotado, finito. En el curso del Renacimiento, las corrientes antiaristotélicas plantearon también una lectura crítica del Hexámeron. Y en sus postrimerías se abrió paso el concepto de universo infinito.

No obstante, habían preparado el terreno tres modelos de larga historia, uno teológico, otro neoplatónico y un tercero astronómico. El teológico se remontaba al autor de las *Recognitiones* atribuidas a Clemente (mediados del siglo IV), el neoplatónico a San Basilio (329-379) y el astronómico a san Isidoro de Sevilla (c.570-636). En el texto pseudoclementino se nos describe un firmamento hecho de hielo sólido y duro como el cristal, que ocupa todo el espacio entre el primer cielo y la Tierra. Aunque el cosmos entero era un solo hábitat, el Creador lo había dividido en dos regiones, una superior y otra inferior, donde habitaba el hombre. Este modelo, amasado con la quintaesencia aristotélica, constituyó el fundamento de unas esferas rígidas y sólidas. Para san Basilio, imbuido de neoplatonismo, el primer cielo (el empíreo de los medievales) había existido antes de la creación en forma de luz incorpórea; postulaba también que el firmamento era aire húmedo. Nuestro san Isidoro acomodaba en el *De rerum natura* los versículos del Génesis a la representación de las esferas de acuerdo con el cosmos geocéntrico clásico.

Agostino Stouco, teólogo renacentista, apoyado en san Basilio, comenzó por plantear varias objeciones contra el universo sólido. Una, de carácter filológico, se basaba en la nueva traducción del término hebreo *rakiah*, que no indicaría firmeza o solidez, sino extensión. Postulaba, además, la existencia de una luz infinita anterior al acto creador e interpretaba las "aguas supracelestes" del Génesis como vapor, es decir, incluidas en el ciclo hidrológico. Se trataba, pues, de un firmamento fluido que encontrará corroboración, andando los años, en la óptica de Jean Pena y los nuevos aparatos que medían la refracción de la luz procedentes de las estrellas. No había un éter distinto del aire. El curso de los cometas y el estallido de las novas harían el resto. Aunque no de golpe. La dificultad de explicar las distancias constantes entre sí de las estrellas permitió mantener durante cierto tiempo una esfera sólida, mientras comenzaba a admitirse un cielo fluido para los planetas.



Virgilio esperando la inspiración con Eneas y Silvio, *frontispicio de un ejemplar que tenía Petrarca de los escritos del poeta latino. (Ilustración de Simone Martini. Bibliotheca-Pinacoteca Ambrosiana, Milán.)*

En la medición de las distancias se había avanzado merced al desarrollo de la matemática, ahora ciencia independiente del tronco de la filosofía (*La Contre-Réforme Mathématique*). Autonomía que nació en el seno de la Compañía de Jesús. Orden religiosa fundada "ad majorem Dei gloriam", afirmaba el "deber de la inteligencia". Prestó, en consecuencia, atención especial a la enseñanza y al contenido depurado de ésta. Dicho compromiso tomó cuerpo en la elaboración del plan de estudios, o "ratio studiorum", sometido a diversas revisiones (1586, 1591 y 1599) que Antonella Romano detalla con pormenor. Figura central del proyecto será C. Clavius en el famoso Colegio Romano, uno de los polos de actividad científica durante el siglo XVI.

En las Constituciones fundacionales leemos ya que deberá tratarse "de la lógica, la física, la metafísica y la moral, así como de las matemáticas en los límites que convienen al fin que se persigue". Cuando en 1548 se estableció el Colegio de Messina, tras años antes del Romano, se confió su dirección al ma-

Vademécum ambiental

INTRODUCTION TO ATMOSPHERIC CHEMISTRY, por Daniel J. Jacob. Princeton University Press; Princeton; New Jersey, 1999.



Libro de ayuda a alumnos de ciencias e ingeniería, sólo exige para su completo aprovechamiento los conocimientos de matemática, química y física correspondientes a los primeros cursos de facultad. Con esa somera base podremos seguirle en su empeño por reducir sistemas muy complejos a modelos simples, que sirven de soporte de predicción o de análisis de los fenómenos atmosféricos.

Se divide en trece capítulos; dedicados los ocho primeros a la física de la atmósfera y a los procesos químicos el resto. Objeto de los apartados iniciales son la composición atmosférica, el concepto de presión, la concentración de las especies químicas y transporte por el viento desde las fuentes hasta los diferentes puntos de observación. Se describen los modelos de caja y multicaja.

El libro pasa luego revista al balance de momento y materia, índices de estabilidad de estratificación en la atmósfera, ciclos geoquímicos de los elementos (nitrógeno, oxígeno y carbono). Llegado a su ecuador, aborda el efecto invernadero producido por los gases dióxido de carbono, metano, óxidos de nitrógeno y el CFC11. Sin olvidar, a renglón seguido, las radiaciones y los aerosoles.

También hallará el lector respuesta suficiente para sus preguntas sobre la oxidación en el aire, el ozono y la lluvia ácida. Un buen programa para una formación sólida en ciencias ambientales y asociadas.

—EMILIANO HERNANDEZ

llorquín Jerónimo Nadal, formado en Alcalá y París, donde parece haber sido profesor de matemáticas. En Messina manda enseñar los *Elementos* de Euclides, la *Arithmetica practica* de Oronce Finé, el astrolabio de Johannes Stoeffler, y la *Theoricae novae planetarum* de Georg Peuerbach, es decir, un programa que incluye los últimos avances de la matemática europea.

En 1552 Nadal propone un segundo texto de organización de la enseñanza. Se establece la figura de "profesor de matemática". Se instaura un programa de formación dividido en tres cursos; centrado el primero en Euclides y la medida, los alumnos estudiarán en el segundo "música especulativa" y "perspectiva" en los libros de Vitellion y Jacques Lefèvre d'Etaples. En el tercer año se abordará la astronomía del Regiomontano y las Tablas Alfonsinas.

El rector Martín de Olave dota al Colegio Romano de una espléndida biblioteca matemática, donde encontramos el planisferio de Ptolomeo, la aritmética de Jordano, el astrolabio de Leonardo de Pisa, *De magnete*, la aritmética de Frison Gemma, el libro de Nunes contra Oronce Finé, la aritmética de M. Luca, el texto sobre la brújula de Vignola, los *Phenomena* de Proclo, la lógica de Soto, los comentarios de Jacques Peletier a Euclides, las *Annotationes sobre las tablas* de Antonio Muri, las Tablas y los *Problemas* de Ambrosio de Nola. De la categorización de la disciplina se ocupará Clavius, él mismo comentarista profundo de la geometría euclidiana, fundamento en su opinión de toda la matemática. Frente a quienes reputaban ésta de mera lucubración, Clavius resaltará la certeza única de sus demostraciones y su carácter central entre las ciencias.

También en la segunda mitad del siglo XVI, la medicina se entrega a una reflexión similar sobre su naturaleza a través de la difusión de las ideas de Paracelso (*Corpus Paracelsisticum*). Wilhelm Kühlmann y Joachim Telle han acometido un proyecto ambicioso cuyos primeros frutos se recogen en este volumen inicial, modelo de crítica textual, ambientación histórica, estudio prosopográfico y análisis conceptual. Se propone recoger la documentación entera, favorable o adversa, sobre la propagación de la obra de Paracelso. Sabido es que Theophrastus Philippus Aureolus Bombastus von Hohenheim (1493-1541), suizo de nacimiento, recibió una buena formación en botánica, minería y metalurgia, cuyos principios se propuso extender a la medicina en particular y a la interpretación del cuerpo humano en general. Así, en *Das Buch Paragranum*, uno de los escasos escritos aparecidos en vida, apoya la medicina sobre los pilares de la filosofía, la astronomía, la alquimia y la virtud.

Aunque disponíamos ya de los trabajos historiográficos de Will-Erich Peuckert, Lyn Thorndike, Allen G. Debus, Frances Amelia Yates y Charles Webster, para conocer la doctrina paracelsista y su recibimiento resulta imprescindible el *Corpus*. Se agavillan en este tomo 39 documentos, en un intervalo temporal que abarca desde 1550, con la carta de Cyriacus Jacobus al conde Ottheinrich sobre *De alchimia opuscula complura veterum philosophorum*, hasta un escrito anónimo de 1564 a un paracelsista sobre los *Etliche tractaten*. En su mayoría, sin embargo, las cartas las remite Adam von Bodenstein (1528-1577), médico y editor de varios trabajos del maestro.

En 1560 da a la imprenta los *Libri quatuor de vita longa*, que dedica al dogo de Venecia Girolamo Priuli. La epístola nuncupatoria hilvana las grandes tesis del pensamiento paracelsista. Nada hay en la naturaleza escondido que, con la ayuda de Dios, no pueda salir a la luz. Propio del hombre nuevo será conocer tales arcanos, desde la piedra filosofal hasta el movimiento continuo, pasando por el acarreo de agua a las cumbres montañosas. Se opondrán a esa búsqueda los que se cierran a toda novedad, que siempre supondrán imposible o falsa. Cuanto se les veló a Platón, Aristóteles, Plinio, Hipócrates y Galeno y tantos otros, se les ha abierto a los paracelsistas. Consideran hitos similares la invención de engranajes de ruedas y pesas capaces de dar la hora exacta, la brújula, la imprenta o la bombarda. El propio Adam declara que puede transformar la tierra estéril y arenosa en fecunda sin necesidad de estercolar. Lo mismo que en el movimiento perpetuo, dice valerse de la magia natural, sabiduría antigua enseñada

De la agresión a la naturaleza a su conservación

INTRODUCCIÓN A LA BIOLOGÍA DE LA CONSERVACIÓN, por Richard B. Primack y Joandomènec Ros. Ariel Ciencia; Barcelona, 2002.

Cuando hay problemas, quejarse no es suficiente. Lo que procede es identificarlos con precisión y hallar las soluciones oportunas. Y si los problemas son graves y de gran alcance, con mayor razón aún debemos buscar urgentemente diagnósticos y terapias. Si ordenáramos los problemas que aquejan a nuestro planeta por su gravedad y alcance, seguramente situaríamos a la crisis de la biodiversidad provocada por la influencia humana en la cabecera de la lista. No vamos a insistir en la descripción de esa crisis; recordemos tan sólo, como dato emblemático que resume la magnitud del problema, que cada año se estima que se extinguen unas 25.000 especies de animales, vegetales o microorganismos. Esas son las quejas y una parte del diagnóstico, y sobre ello se han escrito ya numerosos libros, algunos muy buenos. Sobre lo que no se ha escrito tanto, posiblemente porque se trata de un tema más complejo, es sobre soluciones, y es en este sentido que el libro de Richard Primack y Joandomènec Ros viene como anillo al dedo.

La estructura de "Introducción a la biología de la conservación" sigue una secuencia equivalente a la citada al principio, es decir, queja, diagnóstico y terapia. Muy pronto en el libro se definen los objetivos de la biología de la conservación en tres ámbitos: 1) estudio de la biodiversidad, 2) estudio del efecto de la actividad humana sobre la misma, 3) desarrollo de métodos para minimizar ese efecto.

A diferencia de otros textos sobre biodiversidad, más de la mitad de los contenidos se dedican al tercer aspecto. Los dos primeros capítulos tratan de generalidades de la biología de la conservación y biodiversidad, así como de las amenazas que se ciernen sobre la misma. Pero los tres últimos, que son el corazón del libro, explican cómo se ponen en práctica soluciones de conservación, tanto a escala de poblaciones y especies, como de comunidades y, finalmente, cómo se concilia eso con el desarrollo viable. Esta conciliación está presente en el fondo de todo el libro, desde la misma dedicatoria, que nos habla de encontrar el equilibrio justo entre la protección de la diversidad biológica y la satisfacción de las necesidades humanas. Un reto no solamente difícil, sino también inevitable.

Encuadrada en los cinco grandes capítulos mencionados, se desgrana la información de los diferentes apartados especializados, con temas que van desde la historia natural y la biología fundamental hasta la economía o la ingeniería. Ello muestra de manera fehaciente cómo la biología de la conservación es una síntesis de muchas y variadas disciplinas, al tiempo que hace patentes los méritos del libro de reunir de forma armónica en una sola obra conceptos que proceden de tan diversas fuentes y que tienen métodos muy dispares. El tratamiento es sistemático, y la exposición está pensada como para un libro de texto formal, empleando los recursos didácticos al uso, desde la ordenación cartesiana de las materias hasta el uso de caracteres en negrita cuando conviene subrayar conceptos importantes. La parte gráfica, con 130 figuras, ayuda a la comprensión y permite representar ejemplos reales (por lo demás, el acabado editorial es de primera calidad). No se busque lirismo, como en algunos tratamientos dulzonamente románticos sobre la crisis de la biodiversidad, sino rigor y eficacia en la transmisión de conocimiento, lo cual no es poco.

Conviene también decir algo de los autores en relación con el libro. La idea de preparar un texto sobre "Fundamentos de biología de la conservación" accesible al gran público surgió de Richard Primack, y la primera edición apareció en 1993 de la prensa de Sinauer Associates, editorial que enseguida promovió un dinámico programa de traducciones. En los últimos años, dicho programa incluye traducciones específicas para distintos países y territorios, contando con la coautoría de un especialista local que aporte ejemplos y matices correspondiente al territorio en cuestión. Y ahí está el papel que cubre Joandomènec Ros, aportando datos e ilustraciones locales, pero de manera discreta y pertinente, sin romper el sólido discurso original de Primack. Conviene también subrayar la excelente traducción al castellano de Joan Lluís Riera. Las buenas traducciones no son frecuentes; la de este caso tiene especial mérito puesto que la versión inglesa alberga un buen número de expresiones y de neologismos de difícil traslación.

El resultado global es un buen manual de métodos para minimizar el impacto pernicioso del hombre sobre la naturaleza. Aparte de su interés informativo, evidente, el libro tiene también un interés estratégico: demuestra que hay soluciones para los problemas ambientales de origen antropogénico. El siguiente paso, el de poner en práctica esas soluciones, ya no precisa de libros, sino de voluntad social que se convierta en voluntad política. Es decir, que no hay excusas que justifiquen la inacción.

—XAVIER BELLES

El Sol en nuestra vida

THE 23RD CYCLE. LEARNING TO LIVE WITH A STORMY STAR, por Sten Odenwald. Columbia University Press; Nueva York, 2001.

Cuando empecé a leer el libro creí hallarme ante uno más de los ensayos en torno a los efectos de la actividad magnética solar en el planeta Tierra, obras donde se describen los efectos ligados al campo magnético solar sobre la ionosfera, el campo magnético terrestre, los satélites artificiales y las redes de alta tensión en la superficie terrestre. Pero me encontré con un excelente ensayo científico en el que, además, se realiza un concienzudo estudio de los pocos datos, dispersos e inaccesibles a menudo para el público. Y lo que resultaba harto novedoso: su efecto sobre la vida cotidiana en nuestro planeta.

El título del libro alude al ciclo de actividad número 23 del Sol, en cuyo máximo nos encontramos ahora. Con una periodicidad de once años, el Sol entra en fase activa; emite radiación electromagnética y partículas, ambas de alta energía, que modifican el medio interplanetario, pasan por la Tierra y afectan a su medio circundante, en general protector, de la vida. Esta se ve, pues, modificada; cada vez más, las alteraciones sufridas revisten mayor importancia, son más difíciles de soportar, nos cuestan más dinero y reclaman, por tanto, una mayor atención. De ahí el subtítulo: "Aprender a vivir con una estrella tormentosa".

En la primera parte, se recogen las pruebas de la aparición de fulguraciones en la cromosfera solar en el pasado, relacionándolas con nuestra vida cotidiana. Sabido es que se producen hermosas auroras boreales, perceptibles incluso en latitudes bajas, como el sur de España. Lo que no conocemos tanto es que también producen apagones generalizados en las líneas de alta tensión; así, el último apagón (duró casi un día) en regiones de Canadá (Quebec) y norte de EE.UU., en marzo de 1989. Ni suelen conocerse tampoco los cortes, bastante frecuentes, en las transmisiones de onda corta que suceden cuando se ven alterados el campo magnético terrestre y la ionosfera por una de estas "tormentas".

En nuestra sociedad de creciente tecnificación tales efectos no son esporádicos. Antes bien, menudean los fallos o anomalías provocados en los satélites en órbita de los que dependen las comunicaciones, la televisión, los pagos en cajeros y transacciones económicas, la orientación y navegación de barcos, aviones y hasta camiones, las operaciones médicas a distancia, etc. Las aseguradoras lo saben bien porque son las que pagan cuando un satélite se pierde; los fabricantes de paneles solares para satélites lo saben porque los sobredimensionan; los responsables de su gobierno lo saben porque pierden su control; la NASA lo sabe porque puede afectar a la vida de los astronautas en sus viajes y operaciones extravehiculares en la estación espacial internacional en construcción, etc.

La segunda parte del libro, se dedica a explicar si podemos predecir, para el ciclo 23, los episodios o tormentas más devastadoras. Se expone con mucho detalle el interés de los científicos en conocer mejor sus causas, cómo se producen, cómo se pueden detectar antes de que lleguen al medio espacial terrestre y actúen sobre él. Además, se abordan los esfuerzos, incipientes y escasos, que se realizan en EE.UU. en esta dirección, sobre todo en la organización de un programa nacional de estudio del medio espacial en torno a la Tierra.

El autor cuenta con una larga trayectoria en la divulgación de la astronomía. En este trabajo logra reunir muchas pruebas, repito difíciles de conseguir, que



demuestran que la influencia de la actividad solar es ahora más real que nunca. Es una pena que no nos cuente qué están haciendo el resto de los países, quizá porque no estén haciendo realmente nada, muy poco y, en todo caso, sin coordinación.

En definitiva, es un estupendo libro de lectura para los aficionados, de consulta para distintos usuarios del espacio exterior y de iniciación para aquellos que han oído hablar algo de estos temas pero a quienes nunca les interesó. —TEODORO ROCA CORTES

por la Cábala, Hermes Trismegisto, Beroso, Orfeo, Pitágoras, Platón, la filosofía de los egipciones, caldeos y asirios.

Prescribió Paracelso en *De vita longa*, prosigue Adam von Bodenstein, lo que debe hacerse para curar la enfermedad y conservar la salud. Con una mínima dosis de los simples curaba enfermedades de difícil sanación, conjugando la naturaleza celeste y terrestre. Vio Paracelso en el hombre un carácter doble: uno corpóreo, externo, frágil y caduco, y otro constante, sutilmente penetrante a la manera de los espíritus, celeste y eterno. Los médicos galénicos, ocupándose sólo de la vertiente externa, no pueden curar al hombre entero.

Continúa la exposición de la doctrina en la carta que remite a Adolf Hermann Riedessel de Eisenbach, con motivo de la edición de los *De gradibus, de compositionibus et dosibus receptorum ac naturalium libri septem* de Paracelso. No toda

tierra produce todo, sino que cada región produce cosas buenas y cosas malas; igual puede predicarse de cada edad del hombre. Nada hay firme y estable bajo el amplísimo cielo. Todas las cosas que nacen mueren, y la muerte de una es el nacimiento de otra. Cielo y tierra se hicieron para el hombre; en ellos hay que buscar, pues, para encontrar la salud. La ciencia que los aglutina es la Espagírica, capaz de resolver los cuerpos en sus partes simplicísimas. Tres son los cuerpos más simples: "sulphur" (resina), "sal" y "liquor" (mercurio); de esa *tria prima simplicissima* se forman los cuatro elementos.

En una onda cabalística afín militó Giordano Bruno (*Cosmología, Teología y Religión en la Obra y en el Proceso de Giordano Bruno* y *Giordano Bruno 1548-1600*), aunque partiendo de otros supuestos. Nacido en san Giovanni del Cesco, aldea cercana a Nola, en el reino de Nápoles, fue bautizado con el nombre de Filippo, en honor quizá del hijo del emperador Carlos y futuro Felipe II. Pero el nolano firmaría siempre con el nombre que tomó al ingresar en religión: Giordano, en homenaje a Jordán de Sajonia, el segundo general de la historia de la Orden Dominicana. En ésta cursó la carrera eclesiástica, si bien había estudiado con anterioridad lógica con Giovan Vincenzo Colle y metafísica con Teofilo de Vairano, "su mayor maestro de filosofía".

En las clases y en la biblioteca del Estudio General de san Domenico Maggiore se familiarizó con el aristotelismo escolástico y otras corrientes filosóficas (neoplatónicas, averroístas, avicenistas y nominalistas). Tuvo acceso a los escritos humanistas de Ficino y Pico, a las obras de Nicolás de Cusa y, seguramente, al *De revolutionibus orbium coelestium* de Copérnico. No le fueron ajenas entonces ni la magia natural de Giambattista della Porta, ni la física atomista que reivindicaba Bernardino Telesio. El rechazo pronto de unos y la reelaboración personal de otros determinarán el resultado final de su pensamiento inclasificable.

Abandona en 1576 el convento e inicia una azaroso peregrinaje. Primero por Italia septentrional, época en que se siente atraído por los textos ocultistas de Agrippa de Nettesheim. En 1579 entra en Ginebra, en cuya universidad adscrita a la Reforma da clases de teología. Hubo allí de retractarse de un escrito crítico contra los "errores" de Antoine de la Faye. Marchó a Toulouse, donde expone la teoría psicológica de Aristóteles y redacta un primer borrador de *Clavis magna*, una suerte de plantilla de sus propuestas mnemónico-lulianas que desarrollará más tarde. De Toulouse pasa a París. A Enrique III le dedica en 1582 su primera obra importante, el *De umbris idearum*, inspirado en la tesis de la coincidencia de los opuestos de Nicolás de Cusa y en el neoplatonismo de Plotino. Publica el *Cantus Circaeus*, *Candelaio* y *De compendiosa architectura et complemento artis Lullii*. Si a esta última agregamos la ulterior *De lampade combinatoria Lulliana*, descubriremos su propósito del fundar el arte combinatorio del mallorquín en la unidad de los elementos del universo real y del universo ideal.



Frontispicio de Christophori Clavii Bambergensis e Societate Iesu opera mathematica*. Maguncia, 1612*

Etapa especialmente decisiva de su vida fue la estancia en Londres, llegado en 1583. Da a la imprenta, en 1584, *La cena de le Ceneri*, *De la causa, principio et uno*, *De l'infinito*, *universo e mondi*, *Spaccio de la bestia trionfante*, y, al año siguiente, *Cabala del cavallo pegaseo*, *Con l'aggiunta dell'Asino cillenico* y *De gli eroici furori*. Seis diálogos italianos, consagrados los tres primeros a exponer sus ideas sobre la sustancia una e infinita, sobre la pluralidad de los mundos. Acepta la teoría heliocéntrica y la supera negando la existencia de la esfera de las estrellas fijas. Defiende un universo unitario, sin centro alguno y homogéneo en su constitución material y espacial, poblado de innumerables sistemas planetarios. En su universo homogéneo no existen los lugares naturales de los elementos (contra los aristotélicos), ni una presunta quintaesencia, ni diferencia entre mundo sublunar y supralunar. Desde el punto de vista filosófico, en definitiva, el universo es la actuación de toda posibilidad.

Si en *De l'infinito universo et mondi* define el éter como dos estados diferentes de la misma substancia, en *De immenso* (1591), su última gran obra, establecerá una clara distinción entre éter y "aire"; el "aire" es la sustancia húmeda que respiramos y que pertenece a la Tierra y al espacio; en tanto que el éter es el cielo propiamente dicho, es vacío, es espacio absoluto que penetra los cuerpos y que los rodea infinitamente. Advertía en ese cielo tres categorías: el terrestre, o espacio en torno al nuestro y otros planetas, el cielo interplanetario y el firmamento vasto e inmenso del éter.

—LUIS ALONSO

AVENTURAS PROBLEMÁTICAS

Dennis E. Shasha

Un cuento de hadas

En un país de leyenda, las hadas visitan por las noches a los niños y les regalan perlas. Ahora bien, a cada hada le atrae sólo un color. Supongamos, por ejemplo, que el hada Liana se siente atraída por el azul aguamarina. Dejará una perla en la mesilla de un niño por cada estrella de ese color que vea sobre su cabeza. Otra hada, Ariana, les dejará perlas a los niños que vea bajo astros carmesíes. Así pues, un niño con una estrella aguamarina y otra carmesí recibirá dos perlas. Se propone a los lectores la tarea de averiguar qué color le gusta a cada hada.

He aquí lo que se sabe:

★ Las hadas se llaman Juliana, Katiana, Oliviana, Ania y Heliana.
★ Los colores son: plata, verde salvia, dorado, rosa, turquesa, marfil, violeta, verde esmeralda y ocre.
★ El turquesa le gusta al menos a una de las hadas, y lo mismo el ocre.
★ Los niños se llaman Agustín, Jonás y Tere.
★ Las tres estrellas que Agustín tiene sobre la cabeza son rosa, turquesa y violeta. Jonás las tiene salvia, violeta y marfil. Tere, salvia, violeta y esmeralda.

Y esto es lo que ocurre:

★ La primera noche, Ania, Heliana y Juliana llegan volando y le dejan una perla a Agustín, una a Jonás y dos a Tere.
★ En la segunda noche son Ania, Heliana y Oliviana las de turno. No le dejan perlas a Agustín, pero sí dos a Jonás y dos a Tere.
★ La tercera noche vuelan Ania, Heliana y Katiana. No le dejan a Agustín ninguna perla, pero sí una a Jonás y dos a Tere.
★ La cuarta noche vuelan Juliana, Katiana y Oliviana. Dejan una perla para Agustín y una para Jonás, pero ninguna para Tere.
★ La quinta y última noche Ania, Juliana y Oliviana le regalan una perla a Agustín, dos a Jonás y una a Tere.



Solución del problema del mes pasado:

Alicia puede ganar el juego con independencia de la forma en que Benito disponga las cartas de valor mayor que cuatro. Representemos por *x* cada una de las cartas de Benito. Alicia coloca los demás naipes al final del mazo de manera que el orden sea *x*, *x*, *x*, *x*, *x*, *x*, 4, 4, 3, 3, 2, 2, 1, 1, donde el 1 final simboliza el as de picas. Con esta ordenación, Alicia ganará cualquier partida.

Alicia puede también imponerse en el juego si Benito sitúa siete de las cartas en el orden 5, 1, 2, 6, 7, 3, 3. Alicia, para ganar, no tiene más que insertar los naipes restantes (indicados por corchetes) de modo que la disposición final sea [7], [6], [4], [2], 5, 1, 2, 6, [5], [4], 7, 3, 3, [1]. Ignoro si Alicia puede ganar siempre, ordene Benito sus cartas como las ordene.

Solución en la Red

Se puede ver la solución del problema de este mes visitando www.investigacionyciencia.es.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



VIAJE AL PLANETA MAS LEJANO, por S. Alan Stern

Se está preparando el envío de una nave espacial a Plutón y al Cinturón de Kuiper, la última región inexplorada de nuestro sistema planetario.

EMISORES INALAMBRICOS DE DATOS, por David G. Leeper

De los mismos orígenes de la radio desciende un nuevo sistema de transmisión inalámbrica de datos a gran velocidad desde equipos portátiles.

MAMIFEROS QUE CONQUISTARON LOS MARES, por Kate Wong

Gracias a la recuperación de nuevos fósiles, conjugada con los análisis de ADN, podemos rastrear la curiosa historia de las ballenas en el curso evolutivo.

LA RECOMBINACION HOMOLOGA DEL ADN, por Andrés Aguilera

Utilizada en la elaboración de mapas genéticos y en ingeniería genética, la recombinación homóloga del ADN constituye la base de múltiples procesos biológicos.

LUZ EXTREMA, por Gérard A. Mourou y Donald Umstadter

Focalizando luz de una potencia de 1000 grandes centrales hidráulicas sobre un punto del tamaño del núcleo de una célula, se aceleran electrones hasta la velocidad de la luz en un femtosegundo.

ATEROSCLEROSIS: UNA NUEVA VISION, por Peter Libby

Produce dolor en el pecho, ataque de corazón y apoplejía. Causa más bajas que el cáncer. Merced a la investigación empiezan a desvanecerse viejas ideas sobre el origen y desarrollo de esta enfermedad.

LOS PIGMENTOS DE LAS ILUMINACIONES, por Claude Coupry y Marie-Thérèse Gousset

Azul profundo del lapislázuli o rojo intenso del bermellón: se han estudiado los pigmentos contenidos en la pintura de los decorados que adornan los manuscritos de la Edad Media. Hemos precisado su composición y la evolución de su empleo.

REPLANTEAMIENTO DEL CONSUMISMO ECOLOGISTA, por Jared Hardner y Richard E. Rice

El consumo de productos ecológicos no es suficiente para salvaguardar la biodiversidad de los trópicos. Podría serlo un plan para comercializar servicios de conservación.

